

Fábio Paniza Diaz

**ESTUDO DE EFICIÊNCIA DE UM
SEPARADOR DE PÓ CICLONE E MÉTODOS
DE MEDIÇÃO DESSA EFICIÊNCIA**

Trabalho Final apresentado aos
coordenadores do curso de
PMC-581 - Projeto Mecânico II
do Departamento de Engenharia
Mecânica da Escola Politécnica
da Universidade de São Paulo.

São Paulo
1997

Fábio Paniza Diaz

**ESTUDO DE EFICIÊNCIA DE UM
SEPARADOR DE PÓ CICLONE E MÉTODOS
DE MEDIÇÃO DESSA EFICIÊNCIA**

Trabalho Final apresentado aos
coordenadores do curso de
PMC-581 - Projeto Mecânico II
do Departamento de Engenharia
Mecânica da Escola Politécnica
da Universidade de São Paulo.

Área: Engenharia Mecânica
Ênfase: Projeto e Fabricação

Orientador: Prof. José R. Simões Moreira

Nº USP 2922152

São Paulo
1997

À memória de meu avô Próspero Paniza e de minha tia Dulce Garcia que deixaram saudades e a todos os que têm e tiveram participação na minha formação humana e profissional.

AGRADECIMENTOS

Ao orientador e professor José R. Simões Moreira pelas diretrizes.

À Nestlé Ind. e Com. Ltda, pelo apoio e oportunidade.

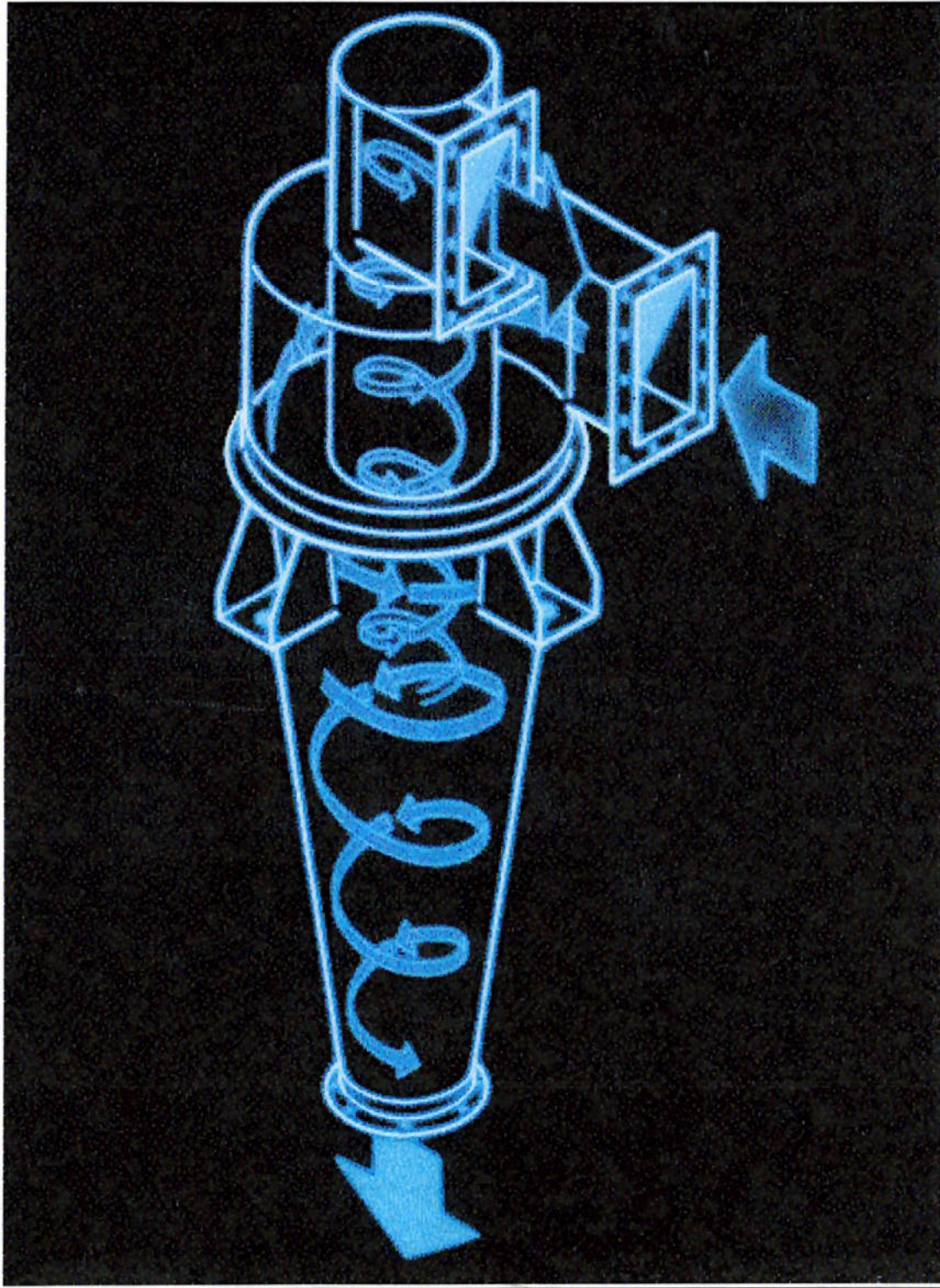
À minha mãe por nunca ter desistido.

À minha namorada e eterna companheira Tamara, pelo estímulo e compreensão.

À minha família, pela assistência.

Aos amigos pelo interesse.

ciclones



SUMÁRIO

1. LISTA DE SÍMBOLOS.....	07
2. INTRODUÇÃO	08
3. SECADOR POR ATOMIZAÇÃO.....	09
4. SEPARADORES	11
5. PROPRIEDADES DO LEITE E DO PÓ.....	12
6. DESEMPENHO DOS COLETORES DE PÓ.....	13
7. SEPARADORES A CICLONE.....	13
8. CAMPOS DE APLICAÇÃO	14
9. MODELOS DO ESCOAMENTO.....	15
10. QUEDA DE PRESSÃO	16
11. EFICIÊNCIA DE COLETA.....	19
12. FATORES NO PROJETO DO CICLONE	22
13. EQUIPAMENTO COMERCIAL.....	25
14. EXEMPLO DE APLICAÇÃO	27
15. MÉTODOS DE AMOSTRAGEM DE PARTICULADO.....	32
16. CONCLUSÃO	57
17. BIBLIOGRAFIA	58

1. LISTA DE SÍMBOLOS

Símb	Definição	Unidades		Unid.
		Mét. (c.g.s.)	Inglês	Especiais
η	Eficiência de Coleta, fração ponderal da dispersão entrante que foi coletada	adimensional	adimensional	ad.
ϕ	Fração ponderal acumulada, com dimensão maior que um dado valor	adimensional	adimensional	ad.
ρ	Densidade do fluido	g/cm ³	lb/ft ³	lb/ft ³
ρ_s	Densidade real dos sólidos	g/cm ³	lb/ft ³	lb/ft ³
ΔP_{cv}	Queda de Pressão, expressa em unidades de pressões cinéticas na entrada do ciclone, baseada na área A_c	adimensional	adimensional	ad.
ΔP_i	Queda de pressão	.....	.....	in de água
A_c	Área de entrada do ciclone = $B_c \cdot H_c$, quando for retangular	cm ²	ft ²	
B_c	Largura da entrada retangular do duto do ciclone	cm	ft	
D_c	Diâmetro do ciclone	cm	ft	
D_E	Diâmetro do duto de saída do ciclone	cm	ft	
D_p	Diâmetro da partícula	cm	ft	
$D_{p\mu}$	Diâmetro da partícula	.....	.....	micron
$D_{p,min}$	Diâmetro mínimo das partículas totalmente coletadas	cm	ft	
D_{PC}	Diâmetro de corte, diâm. das partículas que se coletam 50% das presentes	cm	ft	
$D_{PC\mu}$	Diâmetro de corte, diâm. das partículas que se coletam 50% das presentes	.....	.....	micron
F_{cv}	Perda por atrito no ciclone, expressa como o número de pressão cinética na entrada do ciclone, baseada na área A_c	adimensional	adimensional	ad.
H_c	Altura na entrada retangular do duto do ciclone	cm	ft	
h_{vi}	Pressão cinética na entrada do ciclone	.....	.....	in de água
J_c	Diâmetro de saída do pó	cm	ft	
K	Constante de proporcionalidade empírica, para a queda de pressão no ciclone ou perda por atrito	adimensional	adimensional	ad.
L_c	Comprimento da seção circular do ciclone	cm	ft	
n	expoente	adimensional	adimensional	ad.
N_E	Número efetivo de voltas do gás num separador ciclônico	adimensional	adimensional	ad.
N_{TC}	Número de voltas feita pela corrente de gás num separador ciclônico	adimensional	adimensional	ad.
r	distância a linha central do ciclone, raio	cm	ft	
V_c	Velocidade média na entrada do ciclone, baseada na área A_c	cm/s	ft/s	ft/s
V_t	Velocidade tangencial do gás	cm/s	ft/s	
V_r	Velocidade radial do gás	cm/s	ft/s	
Z_c	Comprimento da seção cônica do ciclone			

2. INTRODUÇÃO

O presente trabalho tem por finalidade o estudo de eficiência de separadores de pó ciclônicos utilizados para separar o pó de leite que está misturado ao ar que sai do processo de secagem. Foi motivado pela falta de eficiência demonstrada por alguns equipamentos utilizados na indústria o que tem trazido alguns prejuízos no que se refere a perda de produto valioso comercialmente.

A disciplina referente ao trabalho está dividida em dois semestres e assim o trabalho também é dividido em duas partes.

A primeira parte, corresponde ao estudo de separadores ciclônicos utilizados na indústria alimentícia para separação de gás e pó, antes porém, torna-se necessária uma explicação geral do processo em que está inserido o ciclone, ou seja, o processo de secagem. Compreende também o estudo preliminar do leite e do pó que objetiva o trabalho.

A segunda parte, referente ao segundo semestre, corresponde ao estudo de um caso de aplicação das teorias levantadas e o estudo de métodos de coleta de pó não separado pelo ciclone para posterior avaliação da eficiência de separação.

3. SECADOR POR ATOMIZAÇÃO

O ciclone se insere no processo de secagem. Existem vários métodos e equipamentos de secagem para leite, faremos uma breve explanação sobre o processo mais utilizado na atualidade pelas indústrias alimentícias, o spray drying.

O secador por atomização transforma líquido ou pasta em forma de pó seco em uma única operação. Neste processo o produto é pulverizado em forma de gotículas no fluxo de ar quente. Devido a sua imensa área de transferência de calor, ocorre rápida evaporação, mantendo a temperatura em nível baixo, não afetando, dessa forma, sua qualidade.

O secador por atomização é basicamente composto de:

Sistema de Alimentação

- tanque de alimentação
- homo-bomba
- linha de alimentação
- atomizador centrífugo ou por bicos de pressão

Sistema de ar de secagem

- filtro de ar
- ventilador de suprimento
- aquecedor de ar
- duto de ar quente

Câmara de secagem

- difusor de ar
- câmara de secagem

Sistema de exaustão

- duto de exaustão
- ciclone com válvula rotativa
- ventilador exaustor
- chaminé

Outros componentes

- estrutura de suporte
- painel de comando e instrumentos

O ar de secagem passa sucessivamente através do filtro, ventilador de suprimento, aquecedor de ar, onde atinge a temperatura desejada e é conduzido ao difusor para distribuição uniforme no interior da câmara de secagem. O produto é bombeado do tanque de alimentação por um homogenizador-bomba para o atomizador centrífugo e pulverizado no fluxo de ar quente.

A secagem das partículas pulverizadas, com ampla superfície de evaporação, ocorre em poucos segundos, mantendo a temperatura do produto seco ao redor de 15 / 20 °C abaixo da temperatura do ar de exaustão.

A maior parte do produto seco é recolhida no fundo da câmara, enquanto que as partículas mais finas são recolhidas no **ciclone**. O produto descarregado de ambas as partes é conduzido através do sistema de transporte pneumático à sala de embalagem, para acondicionamento, já devidamente resfriado, em embalagens de sacos plásticos ou containers.

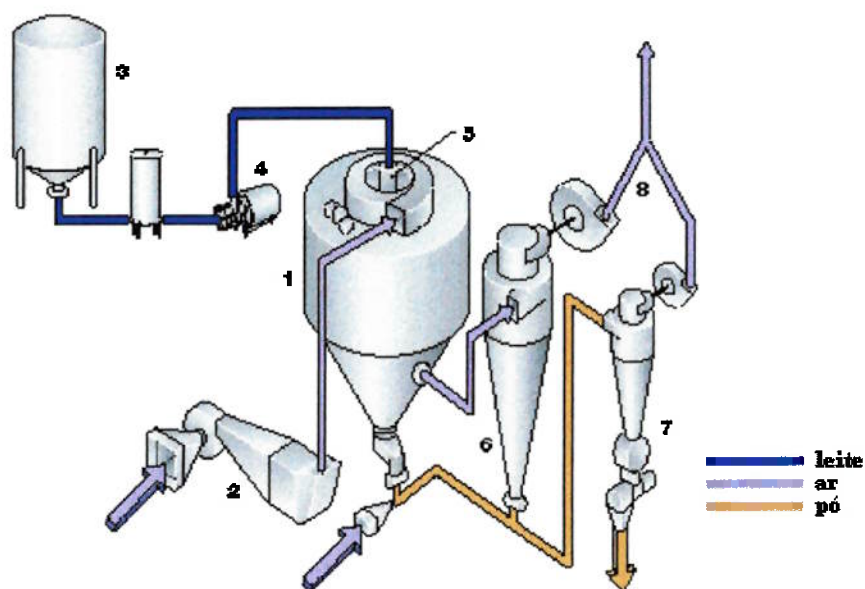


fig.1 Secador convencional (1 estágio)

- 1 - torre de secagem
- 2 - ar de secagem
- 3 - tanque de leite concentrado (45 a 50 %)
- 4 - bomba de alta pressão
- 5 - bico de pulverização
- 6 - ciclone
- 7 - ciclone final
- 8 - saída de ar

As vantagens do processo de secagem são as seguintes

- preservação do produto para acondicionamento por longo tempo;
- redução de peso e volume, economizando custo de embalagem armazenamento e transporte;
- facilidade de manuseio do produto, para processamento industrial subsequente, e para o consumidor;
- valorização do subproduto na comercialização, por exemplo, secagem de soro, sangue, lixívia, resíduos industriais que contém produtos químicos, vinhoto, etc.

Relacionamos, a seguir, alguns segmentos industriais nos quais pode ser usada a secagem por atomização:

- Indústria de Laticínios: para secagem de leite, soro, caseína, substitutos de leite, alimentos infantis, etc;
- Indústrias Alimentícias: para secagem de carboidratos, café solúvel, aroma, cereais pré-cozidos, coalho, extratos de chá, alcaçuz, malte, proteínas de soja, sucos de frutas, tomate, sangue, gelatinas, etc;
- Indústrias Químicas: herbicidas, fungicidas, inseticidas, corantes, pigmentos, materiais cerâmicos, anilinas, polímeros, borrachas, resinas, ácidos e sais orgânicos e inorgânicos, detergentes, tanino, fertilizantes, etc.

4. SEPARADORES

Objetivos da coleta de pó:

- Coleta de produto valioso como na coleta de pó oriundo da secagem de leite;
- Ao controle de poluição do ar;
- A redução de operações de manutenção e limpeza de equipamentos devido ao acúmulo de pó;

5. PROPRIEDADES DO LEITE E DO PÓ

O leite é um líquido branco-opaco, constituído por uma complexa mistura de água, gordura, proteínas, sal, açúcar e vitaminas entre outras coisas.

Os constituintes do leite variam em proporção, dependendo da espécie, raça, época do ano, tipo de alimentação, tempo de lactação, idade do animal, etc. Neste trabalho nos interessa apenas o leite de vaca que segundo Marco a. Moreira Furtado tem a seguinte composição percentual média:

<i>composto</i>	<i>(%)</i>
<i>água</i>	87.00
<i>gordura</i>	3.90
<i>proteína</i>	3.50
<i>lactose</i>	4.90
<i>cinzas</i>	0.70

tab. 1.: Composição percentual do leite

O leite em pó pode ser definido como um produto desidratado obtido do leite, do qual é retirado a água por concentração e ou corrente de ar quente ou por dessecação sobre cilindros aquecidos.

O leite em pó pode ser integral, semi-desnatado, e desnatado; dependendo da gordura do leite a ser secado. O leite em pó para alimentação infantil, deve ser secado em corrente de ar quente, processo esse que preserva a maior parte das características originais do leite *"in natura"*.

Neste trabalho nos interessa apenas a composição do leite em pó desnatado que é em média o que se apresenta na tabela abaixo.

<i>Leite em pó desnatado</i>	<i>(%)</i>
<i>lipídios</i>	0.19
<i>protídios</i>	34.25
<i>glicídios</i>	54.81
<i>sais minerais</i>	7.75
<i>água</i>	3.00

tab. 2.: Composição percentual do leite em pó desnatado

Alguns dados de processo já podem dar uma idéia do estado geral do problema (dados contidos na tabela 3), porém uma análise mais direcionada só será realizada na segunda parte deste trabalho.

<i>dados de processo</i>		<i>unidade</i>
<i>VAZÃO VOLUMÉTRICA DE AR</i>	4860	m ³ /h
<i>TEMPERATURA</i>	60	°C
<i>UMIDADE ABSOLUTA</i>	11,3	g/Kg
<i>VAZÃO DE PÓ</i>	1200	Kg/h
<i>DENSIDADE DO PÓ</i>	79	Kg/m ³
<i>VELOCIDADE DO AR</i>	15	m/s
<i>TAMANHO DAS PARTÍCULAS</i>	de 25 A 125	µm

tab. 3: dados levantados no processo

6. DESEMPENHO DOS COLETORES DE PÓ

O desempenho de um coletor de pó é comumente caracterizado pela eficiência de coleta, designada por η , que é a razão entre a massa de poeira coletada e a massa de poeira entrante no aparelho.

7. SEPARADORES A CICLONE

O equipamento mais usado para a coleta de poeira é o ciclone. Nele o gás carregado de pó entra tangencialmente numa câmara cilíndrica ou cônica, por um ou por mais de um ponto, e sai por uma abertura central (fig. 2). As partículas de poeira em virtude da inércia, tendem a se movimentar para a parede externa do separador de onde são conduzidas a um receptor. O ciclone é, em essência, uma câmara de sedimentação em que a aceleração gravitacional é substituída pela aceleração centrífuga. Nas condições de operação comumente empregadas, a força centrífuga de separação pode ir de cinco vezes (nos ciclones de diâmetro muito grande e pequena resistência) a 2500 vezes a gravitacional, nas unidades muito pequenas, de alta resistência. A entrada da câmara de um ciclone é usualmente retangular.

**Proporções num separador
ciclônico**

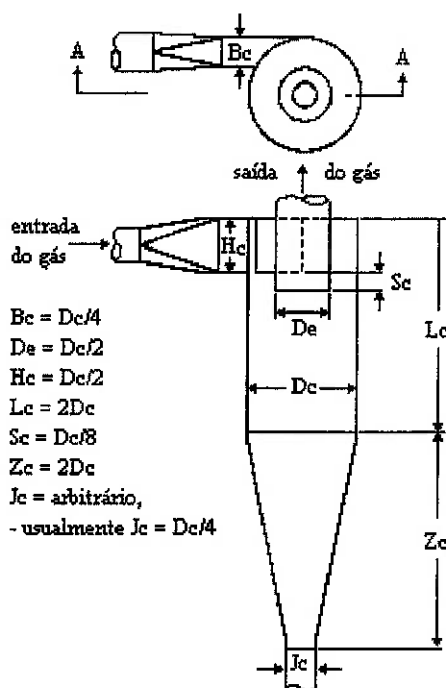


fig.2 Proporções num separador ciclônico

8. CAMPOS DE APLICAÇÃO

Os coletores ciclônicos oferecem um dos meios menos caros de coleta de poeiras do ponto de vista de operação e de investimentos. Empregam-se os ciclones para remover sólidos e líquidos de gases, e líquidos dispersos em gases, operando em temperaturas que vão até 1000°C e pressões tão altas quanto 500 atm. Os ciclones para remover os sólidos de gases são usualmente adotáveis quando estão presentes partículas de diâmetros maiores que 5μ ($0,0002 \text{ in} / 5.10^{-6}\text{m}$), apesar de existirem unidades a tubos múltiplos em paralelo que chegam a ter eficiências de 80 a 85% com partículas de diâmetro igual a 3μ . Os ciclones podem ser usados para coletar partículas de 200μ no diâmetro, embora as câmaras de sedimentação, neste caso sejam satisfatórias e menos sujeitas à abrasão. Em circunstâncias especiais, quando a poeira tem um elevado grau de aglomeração, ou quando a concentração de poeira é grande (acima de $100 \text{ g/ft}^3 / 3,53 \text{ kg/m}^3$), os ciclones removerão as partículas de diâmetros muito menores. Em alguns casos consegue-se

eficiência de 98% com poeiras em que o menor tamanho da partícula está na faixa de 0,1 a 2,0 μ , em virtude do efeito predominante da aglomeração.

9. MODELOS DO ESCOAMENTO

Num ciclone a trajetória do gás envolve uma espiral (hélice) dupla, com o gás espiralando para baixo pela periferia e para cima pela parte central. Quando o gás entra no ciclone sua velocidade sofre uma distribuição, de modo que a componente tangencial da velocidade aumenta com a diminuição do raio, segundo uma lei da forma: $V_t \sim r^{-n}$

A velocidade do gás na espiral pode atingir uma velocidade várias vezes maior que o gás afluente. Considerações teóricas mostram que n deve ser igual a 1,0 na ausência de atrito na parede. As medições reais [Shepherd e Lapple, Ind. Eng. Chem., 31, 972 (1939); 32, 1246 (1940)] indicam que n pode variar de 0,5 a 0,7 numa grande parte do raio do ciclone. Ter Linden [Inst. Mech. Engrs. J., 160, 235 (1949)] descobriu que n é igual a 0,52 nas velocidades tangenciais medidas na parte cilíndrica do ciclone, em posições que vão do raio do tubo de saída do gás até o raio do coletor. Apesar de a velocidade se aproximar de zero na parede, a camada limite é bastante delgada para que as medidas com o tubo de pitot mostrem velocidades tangenciais. A velocidade radial V_r está dirigida para o centro do ciclone, exceto no centro, onde se dirige para a periferia.

Superposto a "espiral dupla" pode haver um "turbilhão duplo" [Van Tongeran, Mech. Eng., 57, 753 (1935). Wellmann, Feuerungstech., 26, 137 (1938)] análogo ao encontrado nas serpentinas. As medições no ciclone que aparecem na fig. 2 indicam contudo, que as velocidades deste turbilhão duplo são pequenas comparadas com a velocidade na hélice (Shepherd e Lapple, op. cit.).

10. QUEDA DE PRESSÃO

A queda de pressão num ciclone também a perda de carga são expressas de forma mais conveniente em termos da pressão cinética nas vizinhanças da área de entrada do ciclone. A pressão cinética em polegadas de água, está relacionada com a velocidade média do gás na entrada, por:

$$h_{vi} = 0,003 \cdot \rho \cdot V_c^2 \quad (1)$$

A perda por atrito no ciclone é uma medida direta da pressão estática e da potência que um ventilador deve desenvolver e está relacionada com a queda de pressão por,

$$E_{cv} = \Delta P_{vc} + 1 - \left(\frac{4 \cdot A_c}{\pi \cdot D_c} \right)^2 \quad (2)$$

Apesar de serem várias as tentativas de calcular a perda por atrito ou a perda de carga a partir de considerações fundamentais, nenhuma é satisfatória, pois as hipóteses simplificadoras não levam em consideração a pressão na entrada, o atrito na parede e a contração na saída, fenômenos estes que tem um efeito grande. Por isso não se dispõe de uma equação geral para os dados de perda de carga no ciclone.

A perda de carga nos ciclones usados na prática pode ir de 1 a 20 vezes a pressão cinética na entrada, variando de acordo com as proporções geométricas. Num ciclone de proporções geométricas específicas no entanto, F_{cv} e ΔP_{cv} são praticamente constantes, independentemente das dimensões do ciclone. A discussão seguinte trata de equações que foram publicadas para a perda de pressão ou perda por atrito num ciclone operando com gases livres de poeira.

Miller e Lissman, investigando os ciclones com entrada involuída, chegaram a seguinte expressão empírica:

$$\Delta P_{cv} = K \left(\frac{D_c}{D_e} \right)^2 \quad (3)$$

O valor de k é praticamente constante, igual a 3,2 nas seguintes faixas de proporções: (B_c/D_e) entre $1/8$ e $3/8$; $(H_c/D_c) \sim 1,0$; (D_e/D_c) entre $1/4$ e $3/4$. Com valores menores de (D_e/D_c) , o de K aumenta, enquanto com valores menores

de (B_c/D_c) o valor de K diminuiu. Nestes ensaios, variavam D_c , D_e e B_c mas não H_c .

Shepherd e Lapple (op. cit.), investigando ciclones do tipo geral esquematizado na fig. 2, obtiveram a seguinte expressão empírica:

$$F_{cv} = \frac{K \cdot B_c \cdot H_c}{D_e^2} \quad (4)$$

Os ensaios cobriram a seguinte faixa de vazões: (B_c/D_e) entre $1/12$ e $1/4$; (H_c/D_c) entre $1/4$ e $1/2$; (D_e/D_c) entre $1/4$ e $1/2$. Com o arranjo normal em que a entrada retangular termina no exterior do elemento externo do corpo do ciclone (cilindro), k tinha o valor de 16,0. Quando a parte interna do duto de entrada estendia-se pela parede do cilindro do ciclone, penetrando no espaço anular, indo até a metade da distância com a parede oposta, formando um “defletor de entrada”, a perda por atrito ficava mais de 50% e K ficava igual a 7,5. A perda de carga calculada mediante a eq. 4, tendo K o valor 13, concorda com os dados de Miller e Lissman com aproximação de mais ou menos 30% na maior parte dos casos. Nas proporções particulares da fig. 1, $F_{cv} = 8,0$ e a queda de pressão é dada por:

$$\Delta P_l = 0,024 \cdot \rho \cdot V_c^2 \quad (5)$$

Os dados que aparecem na literatura comercial referente ao tipo de ciclone da fig. 4 podem ser representados com exatidão pela eq. 4, fazendo K igual a 18,4. As proporções cobertas por este modelo são aproximadamente: $(B_c/D_e) = 5/8$; $(H_c/D_c) = 5/8$; (D_e/D_c) entre $1/2$ e 1. O termo D_c é o diâmetro do cilindro principal, ou superior. O diâmetro grande do cone superior é $1 \frac{5}{8}$ vezes maior que este diâmetro. A queda de pressão do ciclone que aparece na fig. 3, segundo publicação comercial é de :

$$\Delta P_l = 0,013 \cdot \rho \cdot V_c^2 \quad (6)$$

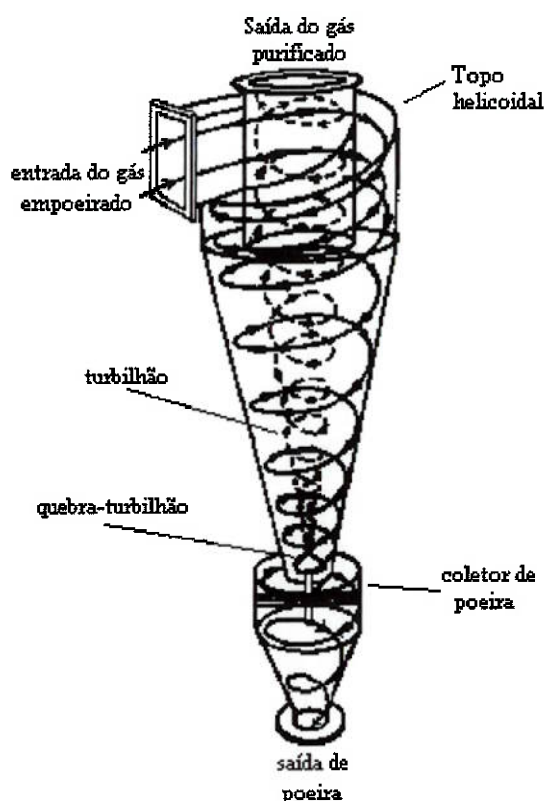


fig.3 Coletor Duclone - Ducon Company

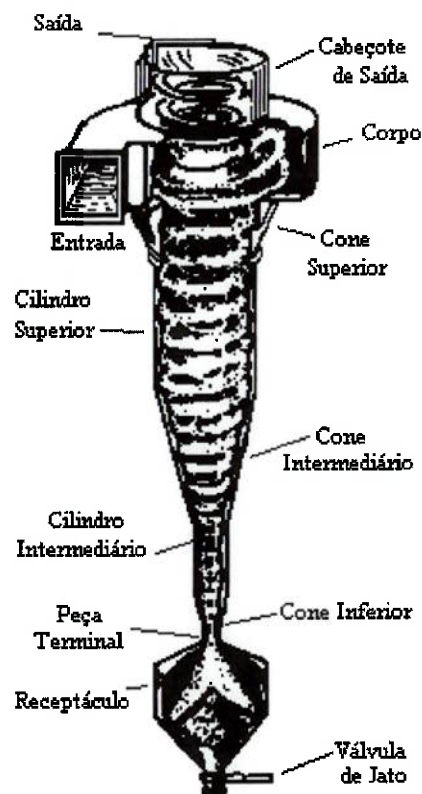


fig.4 Coletor Sirocco, tipo D. (Americam Blower Co.)

l'inoya , investigou o efeito da rugosidade sobre a queda de pressão e descobriu que a queda de pressão diminuía com o aumento da rugosidade. na sua investigação colou partículas de areia de diversos tamanhos na parede do ciclone e obteve os dados de perda de carga que aparecem na **tabela 4**. Segundo *First* (Fundamentals Factors in the Design of Cyclone Dust Collectors, tese de doutorado Universidade de harvard, maio de 1950, em trabalho independente, a perda por atrito na parede reduz a intensidade de turbilhão, e por isso contribui para que a diminuição de pressão não seja tão intensa.

<i>Dimensão das partículas de areia na parede</i>	<i>Queda de pressão, em termos de pressão cinética na entrada</i>
Nula	8,0
Entre 147 e 175 micra, revestimento leve	5,8
Entre 147 e 175 micra, revestimento pesado	4,9
Entre 500 e 1000 micra	4,1

tab.4: Efeito da rugosidade da superfície sobre a queda de pressão no ciclone

11. EFICIÊNCIA DE COLETA

Diversos autores investigaram a duração teórica do movimento das partículas de poeira para a parede do ciclone e Ter Lindem tentou uma previsão teórica do desempenho do aparelho; até agora, no entanto, não existe uma equação fundamental geralmente aceita. A expressão ainda mais satisfatória é a empírica por Rosin, Rammmler e Intelmann. Segundo eles, a seguinte equação dá o diâmetro da partícula que seria completamente separada da corrente de gás num ciclone:

$$D_{p,min} = \left[\frac{9 \cdot \mu \cdot B_c}{\pi \cdot N_{tc} \cdot V_c \cdot (\rho_s - \rho)} \right]^{0,5} \quad (7)$$

As partículas menores são removidas num grau que é proporcional à distância inicial das partículas à parede. A dedução da expressão é baseada na lei de Stokes, com a hipótese de a corrente de gás efetuar um número fixo de voltas com a velocidade ao longo da hélice constante, sem seção de mistura nem turbulência. As relações de Rosin, Rammmler e Intelmann podem ser convenientemente apresentadas na forma que aparece na fig 5 , que dá a eficiência de coleta que se pode esperar para um dado tamanho de partícula, expresso na forma de uma razão com o diâmetro de corte D_{pc} , que se

define por:

$$D_{pc} = \left[\frac{9 \cdot \mu \cdot B_c}{\pi \cdot 2 \cdot N_e \cdot V_c \cdot (\rho_s - \rho)} \right]^{0,5} \quad (8)$$

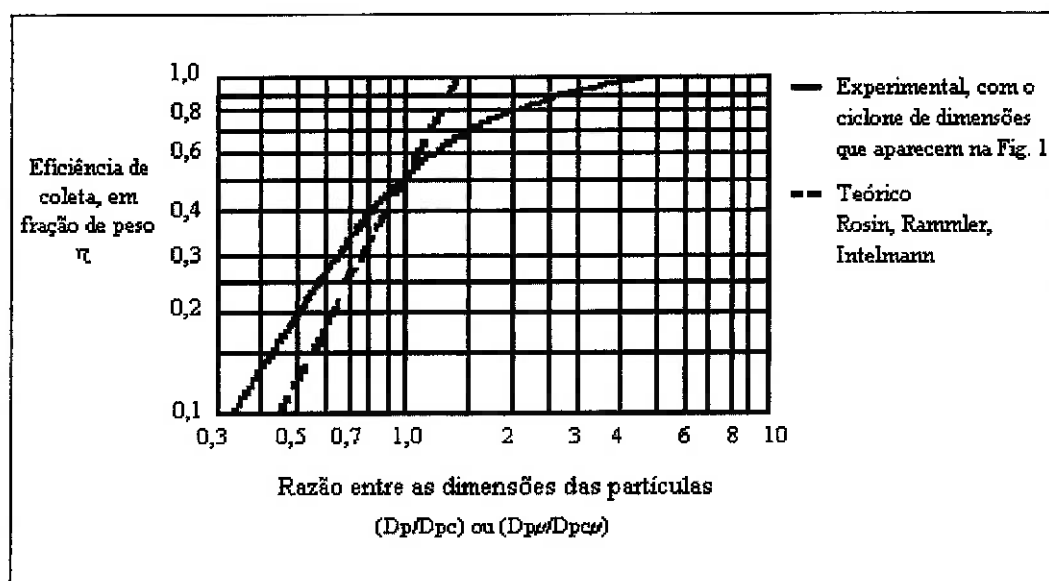


fig.5 Eficiência de Separação dos Ciclones

Este tipo de gráfico é, em essência, uma forma generalizada do gráfico da eficiência "relativa" freqüentemente encontrado na literatura comercial; o diâmetro de corte D_{pc} é a dimensão da partícula que corresponde a uma eficiência relativa de 50%. Na curva de Rosin, Rammner e Intelmann, o fator N_e é idêntico ao fator N_{tc} . Na realidade, conforme se descreveu previamente, o modelo de escoamento é consideravelmente mais complicado, e a curva de separação ou de eficiência de classificação não é tão marcada quanto se poderia esperar pelas figuras. Por isto é necessário basear-se na determinação experimental de uma destas relações. Na ausência de arraste do depósito, a curva, e também o fator N_e devem ser únicos para um ciclone com determinadas proporções geométricas, e o valor de N_e pode ser encarado como uma medida aproximada da eficiência de um dado tipo de equipamento. Quando o arraste do depósito é apreciável, o valor de N_e tende a diminuir com o aumento da velocidade e da densidade do gás.

Na fig. 5 está dada a curva, baseada nos dados experimentais pertinentes a diversas poeiras, para um ciclone com as proporções dadas na fig 2. Neste caso o arrastamento parece ser menor e, com base em dados de fábrica e de laboratório, o fator N_e é aproximadamente igual a 5. Apesar de todos os dados não serem muito exatos, o valor fica além da realidade, pois alguns resultados indicam que o valor de N_e pode chegar até 10. Quando há uma chicana interna, conforme descrição feita acima, o arrastamento se torna apreciável e o valor aparente de N_e é aproximadamente 2, quando as velocidades de entrada no ciclone são da ordem de 50 ft/s, com ar à pressão atmosférica. Os valores mencionados acima para N_e foram determinados em condições em que a floculação de poeira seria relativamente pequena na corrente do gás.

A fig. 5 dá a eficiência de separação que se pode esperar para uma certa dimensão da partícula, enquanto qualquer poeira ou névoa que se encontre é constituída praticamente por partículas numa faixa de dimensões. Por isso, a eficiência de coleta global é um somatório da eficiência de coleta de partículas de cada dimensão, cada qual ponderada de acordo com a fração do total da população que tem esta dimensão. Quando se conhece a distribuição granulométrica das partículas a eficiência global de coleta pode

ser calculada pelo gráfico de η contra ϕ correspondentes a mesma dimensão da partícula, num papel de escalas lineares conforme está na fig 6 . A eficiência global de coleta é então dada mediante a ordenada mediana do gráfico, isto é, pela ordenada que faz iguais as duas áreas hachuradas.

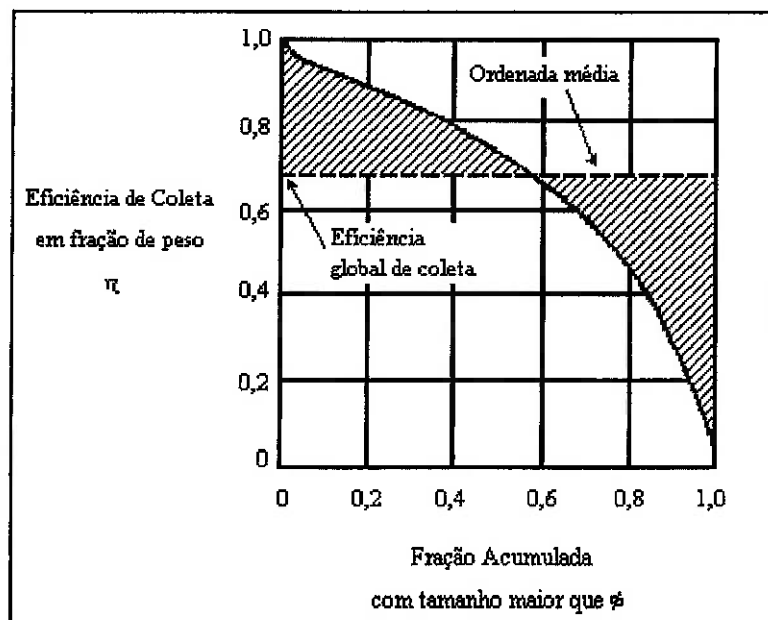


fig.6 Cálculo da Eficiência global de coleta

Em muitos casos uma boa aproximação é obtida fazendo-se a eficiência de coleta global igual a percentagem acumulada de material ϕ de dimensão maior que o tamanho de corte D_{pc} na poeira introduzida no ciclone. A eq. 8 leva em conta a temperatura da operação no fator da viscosidade; por isto dada uma velocidade de entrada, o aumento da temperatura provoca um aumento no tamanho de corte e, correspondentemente, uma eficiência menor. Uma outra aproximação que é razoável estabelece que a eficiência de coleta de um ciclone de um dado tamanho deve ser constante em qualquer temperatura, desde que a perda de pressão se mantenha constante; o resultado é consequência dos efeitos de equilíbrio entre a densidade do gás e a viscosidade.

12. FATORES NO PROJETO DO CICLONE

Os ciclones são projetados, em geral, atendendo a limitações especificadas de perda de carga. Nas instalações comuns, que operam aproximadamente a pressão atmosférica, as limitações da ventoinha determinam a queda de pressão máxima admissível, correspondente a uma velocidade de entrada no ciclone na faixa de 20 a 70 ft/s. Por isso, os ciclones são usualmente projetados para operar com a velocidade inicial de 50 ft/s, embora o dado não seja rígido.

Na remoção de poeiras, a eficiência de coleta só pode ser modificada por valores relativamente pequenos em consequência de alterações operacionais. O fator de projeto principal que pode ser usado para controlar a eficiência de coleta é o diâmetro do ciclone; com uma queda de pressão fixa, a unidade de maior diâmetro terá a maior eficiência. No entanto, os ciclones de pequeno diâmetro deverão ser multiplicados em várias unidades em paralelo para atender a uma certa capacidade. Nestes casos os ciclones individuais podem descarregar em uma tremonha receptora comum. O projeto final envolve um compromisso entre a eficiência de coleta e a complexidade do equipamento. É usual projetar um único ciclone para uma dada capacidade, lançando mão de unidades múltiplas em paralelo somente se a eficiência de coleta for inadequada numa única unidade. Os ciclones em série podem ser aceitáveis nos casos em que a poeira tem as seguintes propriedades.

1. A distribuição granulométrica é ampla, incluindo uma parcela ponderável de finos menores que $15\ \mu$; neste caso um ciclone de diâmetro grande é usado para coletar a fração grossa e reduzir a carga que vai para uma unidade multitubulada de menor diâmetro.

2. A tendência a flocular - no equipamento que precede ao ciclone e no próprio ciclone - é grande.

Na ultima eventualidade, as eficiências previstas com base na distribuição granulométrica serão muito conservativas. Neste caso, por outro lado, apesar de a eficiência ser normalmente aumentada com o aumento da vazão do gás, pode ocorrer o inverso, em virtude do efeito de fragmentação que se verifica nas velocidades altas. Analogamente, é possível que

modificações proporcionais de variáveis, que levem a um aumento de eficiência de coleta quando as poeiras se aglutinem, possam ser prejudiciais no caso de poeiras flocculantes. Os dados disponíveis, no entanto, são suficientes para permitir uma generalização. O fator de floculação é também, provavelmente, a principal razão das inconsistências entre os dados publicados na literatura.

A redução do duto de saída do gás aumentará a eficiência de coleta e a queda de pressão. O aumento do comprimento do ciclone contribui, segundo se crê, para aumentar a eficiência de coleta; os dados disponíveis não são confiáveis para suportar a afirmação. Também não há informação confiável sobre o efeito das proporções de entrada, apesar da fórmula de Rosin, Rammner e Intelmann indicar que para uma dada velocidade de entrada a largura deve ser minimizada. O ciclone desenvolvido pela Mill Mutual Fire Prevention Bureau tem uma entrada retangular relativamente estreita, dimensionada na base do tamanho da partícula a ser coletada. A despesa de fabricação para um duto de transição para um ciclone que tem uma razão entre a profundidade e a largura muito elevada deve ser comparada com a possível melhoria da eficiência de coleta. É essencial que a transição do duto para a entrada seja relativamente gradual, para evitar excessiva perda de carga proveniente da formação de um jato de gás ciclone adentro. Não há concordância entre os projetistas de ciclones quanto ao ângulo ótimo para o cone; os ciclones de alta eficiência, no entanto, têm cones cujo comprimento está entre 1,6 a 3,0 vezes o diâmetro do ciclone.

Um ciclone operará igualmente bem no lado da depressão ou no da compressão de um ventilador, desde que o receptor de poeira seja vedado. *Possivelmente, a maior causa de um desempenho fraco é o vazamento de ar pela saída de poeira do ciclone.* Um vazamento moderado de ar nesse ponto, pode levar a uma enorme queda na eficiência de coleta, especialmente com poeiras finas. Num ciclone sob pressão, o vazamento de ar nesse ponto é prejudicial principalmente pelo levantamento incômodo de poeira no local. Na operação descontínua é preciso dispor de uma moelga ou de um receptor vedado. Quando a retirada de poeira é contínua pode ser usada ou uma válvula rotatória, ou uma válvula de fecho duplo, ou um transportador

parafuso (para poeiras finas). Nos ciclones que operam com pressão ligeiramente negativa, pode ser adotado um tubo de borracha, de extremidade aberta e flexível.

Em geral chicanas de cone e disco, placas defletoras helicoidais, etc..., no interior do ciclone têm um efeito pernicioso sobre a eficiência de coleta. Em circunstâncias especiais, no entanto, alguns destes dispositivos têm o seu mérito. A chapa defletora na entrada reduz a queda de pressão, mas provoca uma redução correspondente na eficiência de coleta. O seu emprego só é recomendado quando a eficiência é normalmente tão elevada que se torna uma consideração secundária, ou quando se deseja diminuir a resistência de um sistema existente para aumentar a capacidade de operação, ou quando as considerações sobre o espaço horizontal ou vertical são os fatores controlantes. Quando se adota uma defletora na entrada é vantajoso aumentar o comprimento do duto de saída do gás dentro da câmara do ciclone. Quando não se pode impedir o vazamento de gás na saída da poeira, pode ser conveniente instalar uma chicana circular ou cônica abaixo do duto de saída do gás. A suspensão de uma corrente pesada no duto de saída do gás tem efeito benéfico na diminuição do acúmulo de poeira nas paredes do ciclone. A corrente deve ser fixa por intermédio de uma articulação, de forma a poder girar sem enroscar-se. Não existe, atualmente, nenhum dispositivo conhecido que recupere a energia do gás espiralante no duto de saída. Todos os dispositivos que se utilizam para reduzir a queda de pressão operam mediante a diminuição das velocidades na espiral da câmara do ciclone e, por isso, provocam redução na eficiência de coleta.

Quando a carga de poeira é pequena, a pressão no receptor de um único ciclone será, em geral, mais baixa que no duto de saída do gás. O aumento da carga de poeira provoca o aumento no receptor. Dispositivos como discos cones, defletores fazem, em geral, com que a pressão do receptor de poeira seja maior que no duto de saída do gás. Um ciclone opera igualmente bem na posição horizontal e na vertical. O afastamento em relação à verticalidade provoca um aumento da tendência de entupimento da saída da poeira. Quando esta saída fica entupida, a eficiência de coleta será, como é obvio, diminuída. Quando o duto de saída tiver que ser reduzido para acoplar-

se à tubulação subsequente, a transição deve ser feita pelos menos cinco diâmetros a jusante do ciclone, preferivelmente depois de um joelho. No caso da transição se feita mais próxima do ciclone, recomenda-se a instalação de uma cruzeta para evitar a excessiva perda de carga.

Com o aumento das cargas de poeira haverá um aumento da eficiência de coleta e diminuição da perda de pressão (Drijver, op. Cit.; Shepherd e Lapple, op. Cit.). Com a carga de poeira acima de 200 g/ft^3 , a perda de pressão pode ser igual a metade da calculada na ausência de poeira.

13. EQUIPAMENTO COMERCIAL

Os ciclones são disponíveis em uma grande variedade de formas, desde as unidades compridas, semelhantes as que aparecem na fig. 02, até as unidades curtas de grande diâmetro. O corpo pode ser cônico ou cilíndrico, e as entradas podem ser recurvadas ou tangenciais, redondas ou retangulares.

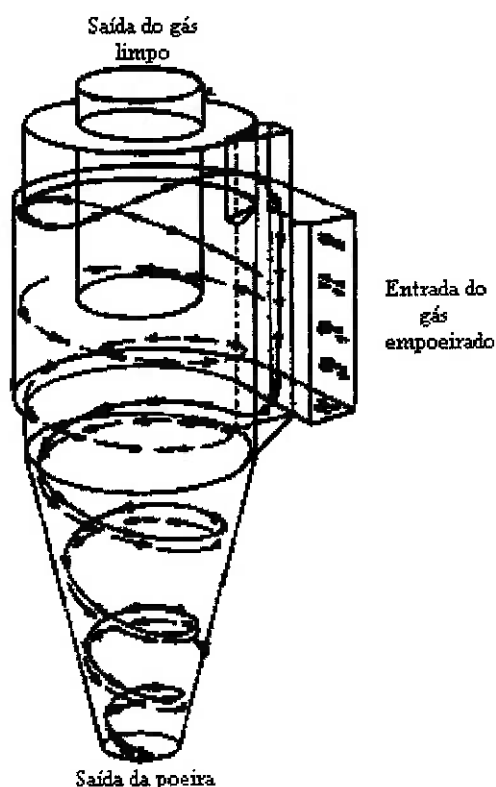


fig.7 Ciclone Van Tongeren. (Buell Engineering Co.)

Nas figuras 3, 4 e 7 aparecem alguns tipos especiais de ciclones industriais. No **multiciclone** o movimento aspiralado é atribuído ao gás por palhetas anulares ; ele é fornecido em unidades múltiplas , com 6 e 9 in de

diâmetro. O maior campo de aplicação é na coleta da cinza fina de caldeiras a vapor. Os tubos são construídos em ferro fundido e em outras ligas resistentes à abrasão. O ciclone **Ducon** utiliza uma entrada em caracol e uma cobertura helicoidal, para reduzir a queda de pressão. O campo principal de atuação tem sido nas indústrias de petróleo e metalúrgica, em instalações em série ou em paralelo associadas a contactores a sólidos fluidizados. É fabricado em aço ou em aço inoxidável, soldado e pode ser revestido por materiais cerâmicos. O fabricante assegura aumento de eficiência provocado por um defletor cônico colocado, às vezes, no fundo do cone. Este dispositivo é usado apenas com poeiras que escorrem livremente, pois provoca entupimento com materiais pegajosos.

O ciclone **Van Tongerem** (fig5) utiliza, segundo anúncio, o “turbilhão duplo” para aumentar a eficiência de coleta, mediante uma linha de contorno no topo da parte cônica do equipamento. É feito em aço e chapas de ligas, soldadas e tem uma ampla utilização. O ciclone **cirocco**, tipo D, tem um duto anular de saída que pode ser trocado para aumentar ou diminuir a eficiência de coleta, com um aumento ou diminuição correspondente na queda de pressão. É de aço ou de liga, soldado, e pode ser fornecido com um cone em ferro fundido, para aplicações com material abrasivo. Existe em vários tamanhos e tipos. Existe em vários tamanhos e tipos para aplicações com vários tamanhos de corte. A unidade **Dustex** emprega ciclones múltiplos com diâmetro de 5 in, em paralelo para aplicações em que a carga de poeira não excede a 10 g/ft³. O tamanho de corte (eficiência relativa de 50%) é de 1,3 μ nas poeiras de densidade relativa igual a 2,4 suspensas no ar nas condições ambientes. Para evitar acumulação de poeira, entupimento e a distribuição defeituosa do gás que daí resulta, este ciclone dispõe de bancos verticais de tubos, de entradas tangenciais, e tem um modelo que possibilita a recirculação dos gases limpos em torno do exterior do ciclone, de forma a minimizar a condensação dos gases em temperaturas próximas das do ponto de orvalho. Os materiais padrão de construção são o ferro fundido, o alumínio fundido e os aços inoxidáveis soldados.

14. EXEMPLO DE APLICAÇÃO

O exemplo que se segue (fig. 8) visa a aplicação dos conceitos vistos até agora, porém nesta situação não se pode alterar parâmetros de processo no intuito de melhorar a eficiência do ciclone pois a vazão de ar estabelecida é a vazão ótima para o processo de secagem (neste caso), portanto analisaremos algumas modificações no que se refere a parte dimensional do ciclone.

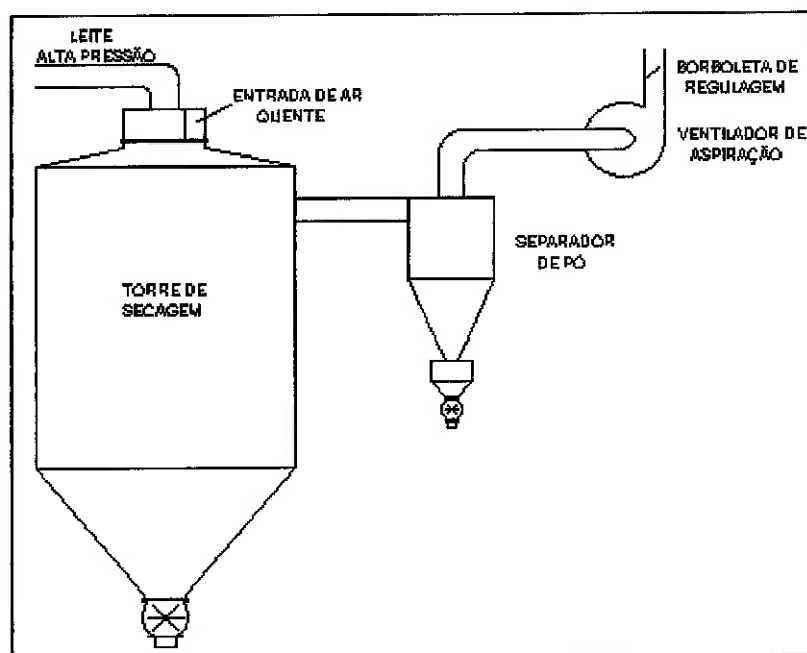


Fig. 9: exemplo de aplicação

Abaixo, os dados relativos a instalação:

		<i>unidade</i>
VAZÃO VOLUMÉTRICA DE AR	4860	m ³ /h
TEMPERATURA	60	°C
VISCOSIDADE DO AR	1,7.10 ⁻⁵	Kg/ms
DIÂMETRO DA TUBULAÇÃO	300	mm
COMPRIMENTO DA TUB.	8	m
VELOCIDADE DO AR	15	m/s
VELOCIDADE DO AR NO CICLONE	14,3	m/s
PRESSÃO NO SECADOR	-10	mmca
UMIDADE ABSOLUTA	11,3	g/Kg
VAZÃO DE PÓ	1200	Kg/h
DENSIDADE DO PÓ	79	Kg/m ³
DENSIDADE DO AR	0,9	Kg/m ³
TAMANHO DAS PARTÍCULAS	25 a 100	µm

tab. 5: dados do problema

CURVA DO SISTEMA

O ventilador deverá acelerar o ar, vencer os atritos e a depressão no secador:

$$H = \Delta P_{\text{sec ador}} + \frac{\rho \cdot Q^2}{2 \cdot g \cdot S^2} + \text{Perdas}_{\text{tub}} + \text{Perdas}_{\text{borb}} + \Delta P_{\text{ciclone}} \quad (1)$$

$$\Delta P_{\text{sec ador}} = 10 \text{ mmca}$$

$$\frac{\rho \cdot Q^2}{2 \cdot g \cdot S^2} = 9,2 \cdot Q^2$$

$$\text{Perdas}_{\text{tub}} = f \cdot \frac{8 \cdot L \cdot Q^2}{g \cdot \pi^2 \cdot D^5} = 10,9 \cdot Q^2 \quad \text{onde } f = 0,04$$

$$\text{Perdas}_{\text{borb}} = 0,2 \cdot \frac{\rho \cdot Q^2}{2 \cdot g \cdot S^2} = 2,0 \cdot Q^2$$

$$\Delta P_{\text{ciclone}} = 86,2 \cdot Q^2 \quad \text{curva do fabricante}$$

$$\text{Logo: } H = 10 + 108,3 \cdot Q^2$$

A figura 8 mostra as características dimensionais do ciclone estudado, a figura 9 mostra a curva de perda de carga fornecida pelo fabricante para o ciclone em estudo e a figura 10, a seleção do ventilador de 2,0 BHP de acordo com uma vazão de processo de 1,35 m³/s.

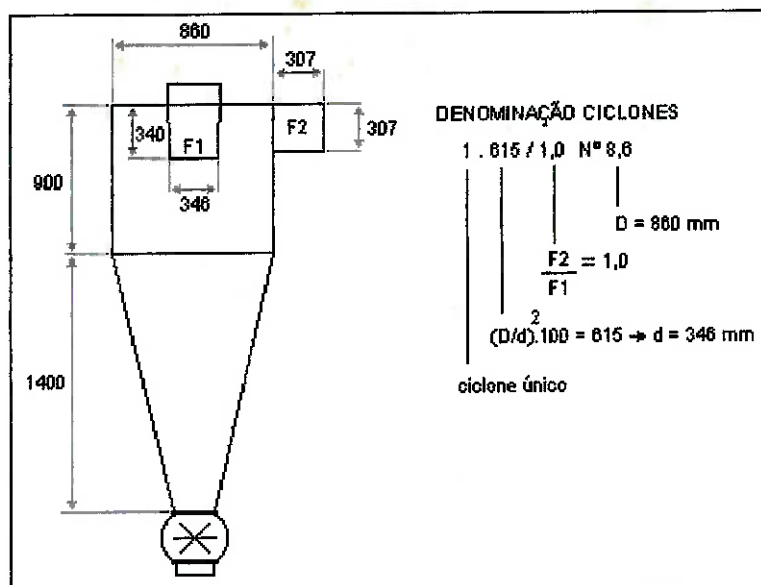


Fig. 8: Desenho e denominação do ciclone em estudo

PERDA DE CARGA X VAZÃO CICLONE 1 . 615 / 1,0 N° 8,6 DADOS DO FABRICANTE

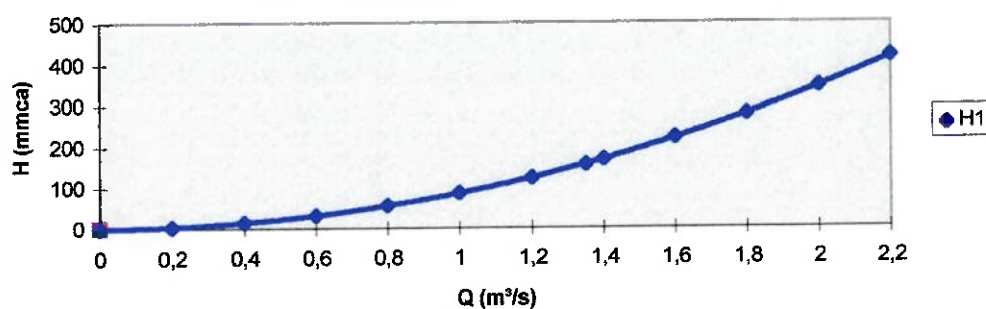


Fig. 9: curva do ciclone

CURVA CARACTERÍSTICA DO SISTEMA X CURVAS DE ALGUNS VENTILADORES

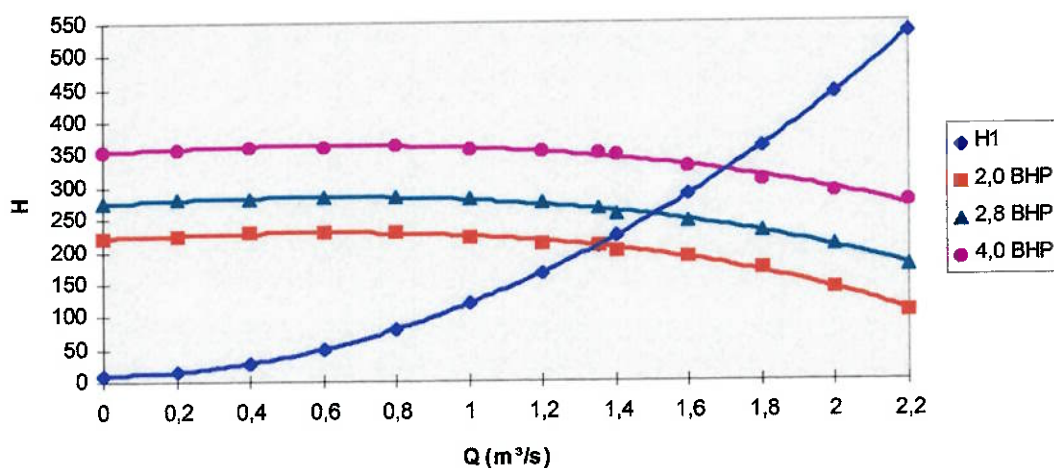


Fig. 10: curva do sistema x alguns ventiladores

Para a nova condição (ciclone figura 11), podemos redimensionar os cálculos para o sistema:

$$H = \Delta P_{\text{sec ador}} + \frac{\rho \cdot Q^2}{2 \cdot g \cdot S^2} + \text{Perdas}_{\text{tub}} + \text{Perdas}_{\text{borb}} + \text{Perdas}_{\text{entrada}} + \Delta P_{\text{ciclone}}$$

$$\Delta P_{\text{sec ador}} = 10 \text{ mmca}$$

$$\frac{\rho \cdot Q^2}{2 \cdot g \cdot S^2} = 9,2 \cdot Q^2$$

$$\text{Perdas}_{\text{tub}} = f \cdot \frac{8 \cdot L \cdot Q^2}{g \cdot \pi^2 \cdot D^5} = 10,9 \cdot Q^2 \quad \text{onde } f = 0,04$$

$$\text{Perdas}_{\text{borb}} = 0,2 \cdot \frac{\rho \cdot Q^2}{2 \cdot g \cdot S^2} = 2 \cdot Q^2$$

$$\text{Perdas}_{\text{entrada}} = 0,4 \cdot \frac{\rho \cdot Q^2}{2 \cdot g \cdot S^2} = 4 \cdot Q^2$$

$$\Delta P_{\text{ciclone}} = 110 \cdot Q^2$$

$$\text{Logo: } H = 10 + 136,1 \cdot Q^2$$

Onde a curva de perda de carga do ciclone para a nova condição, foi estimada através da aproximação por curvas de outros modelos.

A figura 12 mostra a seleção do ventilador de 2,8 BHP de acordo com uma vazão de processo de 1,35 m³/s.

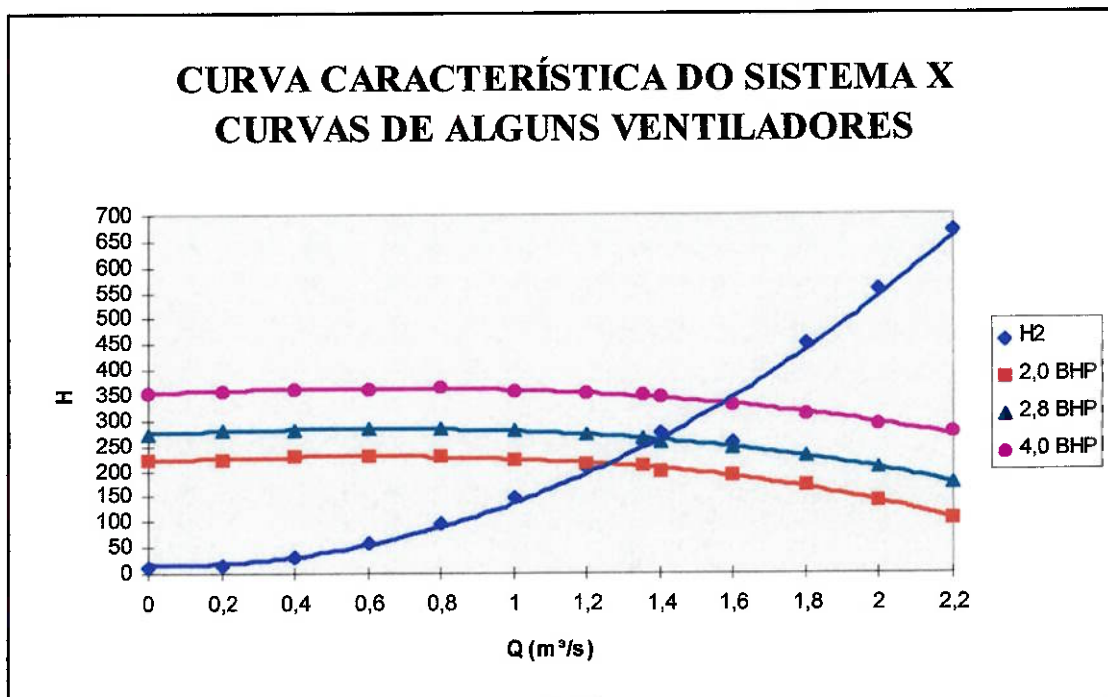


Fig. 12: curva do sistema x alguns ventiladores

DIÂMETRO DE PARTÍCULA MÍNIMA

Para as novas condições:

$$B_c = 250 \text{ mm}$$

$$N = 8 \text{ (aumento da seção circular)}$$

$$V = 21,6 \text{ m/s}$$

$$\text{Teremos: } D_p = \left(\frac{9 \cdot \mu \cdot B_c}{\pi \cdot N \cdot V \cdot (\rho_s - \rho)} \right)^{\frac{1}{2}} = 35 \mu\text{m}$$

O que nos mostra que o o diâmetro de partícula que será totalmente separado caiu de 50 para 35 μm , muito próximo do limite inferior de particulado que é de 25 μm .

15. MÉTODOS DE AMOSTRAGEM DE PARTICULADO

A seguir demonstra-se a metodologia de amostragem de efluentes gasosos em fontes estacionárias segundo a norma ABNT e CETESB.

MÉTODO 1

DETERMINAÇÃO DE PONTOS DE AMOSTRAGEM EM DUTO OU CHAMINÉ DE PONTES ESTACIONÁRIAS

1. OBJETIVO

1.1. Este método fixa as condições exigíveis para a determinação de pontos de amostragem numa seção transversal de duto ou chaminé de fontes estacionárias

1.2. Este método só é aplicável nos casos em que o sentido do fluxo é conhecido

1.3. Este método não é aplicável quando:

- O fluxo dos gases é ciclônico
- O duto ou a chaminé tem diâmetro interno menor que 0,3m ou a seção transversal com menos de 0,07 m²

- Não for possível encontrar uma seção transversal que, esteja entre 2 diâmetros internos à montante e 0,5 diâmetros internos à jusante no sentido do fluxo. Caso o duto ou chaminé tenha seção retangular, o diâmetro aqui referido será o diâmetro equivalente.

- Nota: casos especiais terão seus resultados validados após estudos e aprovação pelo órgão oficial de controle do meio ambiente.

2. DEFINIÇÕES

Para os efeitos deste método são adotadas as seguintes definições:

2.1. FLUXO CICLÔNICO: aquele no qual as linhas do fluxo não são paralelas ao eixo longitudinal do duto ou chaminé

2.2. PITOT “S”: instrumento constituído de 2 tubos paralelos com duas tomadas de pressão, uma no mesmo sentido do fluxo e a outra em sentido contrário.

2.3. BOQUILHA: componente móvel da sonda , por onde é captado o material a ser analisado.

3. CONDIÇÕES GERAIS

3.1 OCORRÊNCIA DE FLUXO CICLÔNICO

- Para a verificação da ocorrência do fluxo ciclônico deve-se:
- Conectar um tubo de pitot s a um manômetro. Nivelar e zerar o manômetro.

- Posicionar o tubo de pitot s em cada ponto da seção transversal. Considerar como referência 0 (zero graus) a posição em que os planos das aberturas forem perpendiculares à seção transversal.

- Ler a indicação do manômetro. Se der indicação diferente de zero, girar o tubo de pitot s até obter leitura nula no manômetro e anotar o ângulo de giro com aproximação de 1.

- Calcular a média dos valores absolutos de todos os ângulos, incluindo aqueles em que a rotação não foi necessária (ângulo igual a zero). Se a média for maior que 10 graus a condição é de fluxo ciclônico.

3.2. SELEÇÃO DA SEÇÃO TRANSVERSAL

3.2.1. SEÇÃO CIRCULAR

Para chaminés ou dutos de seção circular, a amostragem ou tomada de velocidade deve ser realizada, sempre que possível, na seção transversal situada a pelo menos 8 diâmetros internos à montante e pelo menos 2 diâmetros internos à jusante de qualquer distúrbio do fluxo, tal como o causado por curva, expansão, redução, chama visível, entrada ou desvios. Caso isto seja impraticável, deve ser selecionada uma seção transversal que esteja a pelo menos 2 Di à montante e 0,5 Di à jusante de qualquer distúrbio do fluxo.

3.2.2. SEÇÃO RETANGULAR

Para chaminé ou dutos retangulares, calcula-se o diâmetro equivalente pela seguinte fórmula:

$$Deq = \frac{2.c.l}{c+l}$$

onde Deq = diâmetro equivalente, (m)

c = comprimento, (m)

l = largura, (m)

4. CONDIÇÕES ESPECÍFICAS

4.1. DETERMINAÇÃO DO N° DE PONTOS:

4.1.1 AMOSTRAGEM DE MATERIAL PARTICULADO EM DUTO OU CHAMINÉ DE SEÇÃO CIRCULAR

Quando a seção transversal selecionada for circular e satisfizer o critério de 8 Di e 2 Di, o número mínimo de pontos será:

8 - para diâmetro interno entre 0,3 e 0,6 m

12 - para diâmetro interno maior que 0,6 m

4.1.1.1 Quando a localização da seção transversal estiver fora da faixa de 8 e ou 2 diâmetros internos, o número mínimo de pontos é obtido da figura 13, Antes de se fazer uso desta figura, medem-se as distâncias da seção até o distúrbio de fluxo anterior e até o posterior, e exprimem-se essas distâncias em diâmetros internos. Assim da figura em anexo, obtêm-se dois números, um a partir da distância a jusante e outro a distância á montante (que podem ser

iguais), escolhe-se o maior e este deve ser considerado como sendo número mínimo de pontos.

nota: nos dutos circulares o número de pontos deve sempre ser múltiplo de 4.

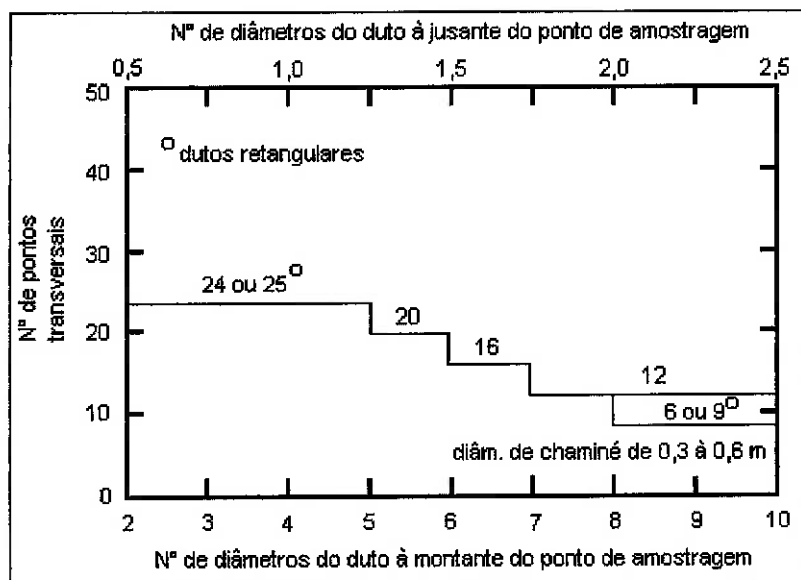


Fig. 13: n° mínimo de pontos transversais

4.1.2. AMOSTRAGEM DE MATERIAL PARTICULADO EM DUTO OU CHAMINÉ DE SEÇÃO RETANGULAR

4.1.2.1. Quando a seção transversal selecionada for retangular e satisfizer o critério de $8 D_i$ e $2 D_i$, o número mínimo de pontos será:

9 - para diâmetro interno entre 0,3 e 0,6 m

12 - para diâmetro interno maior que 0,6 m

4.1.2.2. Quando a localização da seção transversal estiver fora da faixa de 8 e ou 2 diâmetros internos, o número mínimo de pontos é obtido da figura 13. Antes de se fazer uso desta figura, medem-se as distâncias da seção até o distúrbio de fluxo anterior e até o posterior, e exprimem-se essas distâncias em diâmetros equivalentes. Assim, da figura em anexo, obtêm-se dois números, um a partir da distância a jusante e outro a distância á montante (que podem ser iguais), escolhe-se o maior e este deve ser considerado como sendo número mínimo de pontos.

4.1.3 TOMADA DE VELOCIDADE

Para determinar a velocidade ou a vazão dos gases, adotam-se os mesmos procedimentos da seção 4.1.1 ou 4.1.2, utilizando-se porém a figura 14.

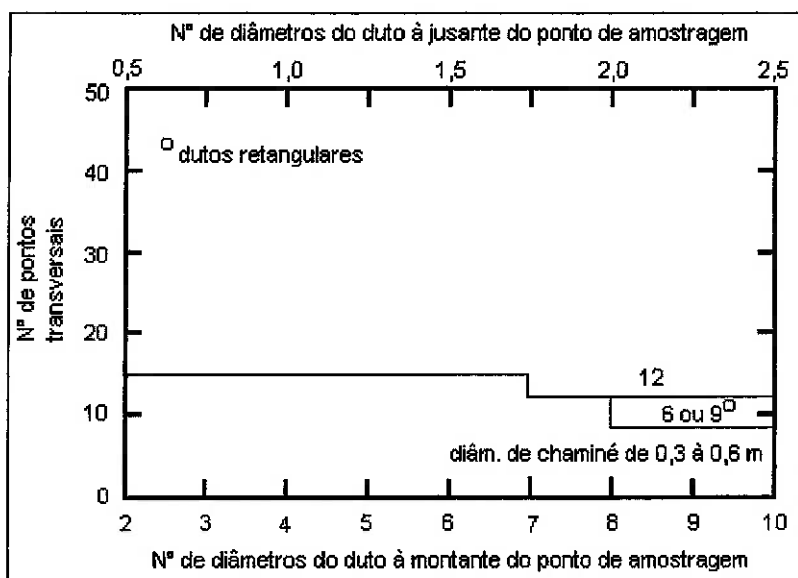


Fig. 14: n° mínimo de pontos para determinação da velocidade

4.2. DISPOSIÇÃO DOS PONTOS NA SEÇÃO TRANSVERSAL

4.2.1. SEÇÕES CIRCULARES

4.2.1.1. Uma vez determinado o número de pontos da seção transversal, eles devem ser dispostos sobre dois diâmetros perpendiculares (metade em cada diâmetro). A tabela 6 dá a porcentagem do diâmetro para a disposição de cada ponto

4.2.1.2. Para a amostragem de material particulado, um dos diâmetros deve ficar no plano onde é esperado a maior variação de concentração

4.2.1.3. Em dutos ou chaminés com diâmetro maior que 0,6 m nenhum ponto deve estar posicionado a uma distância inferior a 2,5 cm da parede. Caso o diâmetro interno da boquilha seja maior que 2,5 cm, a distância a partir da parede deverá ser no mínimo igual a esse diâmetro. Em dutos ou chaminés com diâmetro inferior a 0,6 m, nenhum ponto deve estar posicionado a uma distância inferior a 1,5 cm. Se alguns dos pontos coincidem, estes devem ser tratados como pontos distintos, mesmo não havendo movimentação da sonda.

4.2.2. SEÇÕES RETANGLARES

Uma vez determinado o número de pontos da seção transversal, tira-se da tabela 7 a matriz para a configuração da malha. Divide-se o maior lado da seção retangular pelo segundo número. Assim, configurados os retângulos elementares, no centro de cada um deles será localizado um ponto. Caso se deseje aumentar o número de pontos, deve-se a partir da matriz inicial e aumentar o número de divisões em um dos lados da matriz ou em ambos.

Disposição dos pontos de amostragem em dutos ou chaminés circulares (porcentagem do diâmetro a partir da parede ao ponto)

n° de ordem no diâmetro	número de pontos no diâmetro					
	2	4	6	8	10	12
1	14,6	6,7	4,4	3,2	2,6	2,1
2	85,4	25,0	14,6	10,5	8,2	6,7
3		75,0	29,6	19,4	14,6	11,8
4		93,3	70,4	32,3	22,6	17,7
5			85,4	67,7	34,2	25,0
6			95,6	80,6	65,8	35,6
7				89,5	77,4	64,4
8				96,8	85,4	75,0
9					91,8	82,3
10					97,4	88,2
11						93,3
12						97,9

tab. 6:

Disposição dos pontos em dutos e chaminés retangulares

<i>n° de pontos</i>	<i>matriz</i>
9	3 x 3
12	4 x 3
16	4 x 4
20	5 x 4
25	5 x 5

tab. 7

MÉTODO 2

DETERMINAÇÃO DA VELOCIDADE E VAZÃO DOS GASES

1. OBJETIVO

1.1. Esta norma prescreve o método da determinação da velocidade média e da vazão volumétrica do fluxo gasoso em dutos ou chaminés de fonte estacionária, utilizando o tubo de pitot "S".

1.2. Esta norma não se aplica nos casos previstos na seção 1.3. do método 1.

2. MÉTODOS COMPLEMENTARES

Na aplicação deste método é necessário consultar as seguintes normas:

método 1 - determinação do número de pontos em dutos ou chaminés

método 3 - determinação da massa molecular seca e do excesso de ar

método 4 - determinação da umidade dos gases

3. DEFINIÇÕES

Para os efeitos deste método são adotadas as seguintes definições

3.1 PRESSÃO DE VELOCIDADE: pressão produzida pelo deslocamento de um fluido. Esta pressão é exercida no mesmo sentido da velocidade do fluido. Também chamada de pressão cinética.

3.2 VELOCIDADE MÉDIA: média aritmética das velocidades numa seção transversal de um duto ou chaminé, medidas nos pontos de amostragem.

3.3 VAZÃO VOLUMÉTRICA: volume de um gás que passa através da seção transversal de um duto por unidade de tempo.

3.4 CONDIÇÃO PADRÃO (DOS GASES NUMA CHAMINÉ OU DUTO): temperatura de 20°C e pressão de 760 mmHg. A aparelhagem compreende:

- tubo de pitot s

- medidor de pressão diferencial capaz de medir uma variação de pressão de 1,3 mmca, ou micromanômetro para os caso em que as pressões encontradas forem inferiores a 1,3 mmca
- termômetro do tipo termopar capaz de medir uma variação menor ou igual a 1,5 % da temperatura absoluta mínima dos gases da chaminé
- manômetro em U capaz de acusar uma variação inferior ou igual a 333 Pa (2,5 mmHg)
- barômetro de mercúrio, capaz de acusar uma variação inferior ou igual a 333 Pa (2,5 mmHg)
- analisador dos gases de combustão

4. PROCEDIMENTO

4.1. PREPARO DO EQUIPAMENTO

4.1.1. Montar a aparelhagem conforme a figura 1 em anexo e verificar todas as conexões para que não ocorram vazamentos

4.1.2. Nivelar e zerar o manômetro

4.1.3. Fazer o seguinte ensaio para verificar a presença de vazamentos:

- injetar ar através da abertura do tubo de impacto até que o manômetro em U registre uma pressão de pelo menos 745 Pa (7,6 cmca) e fechar a abertura de impacto. A pressão deve permanecer estável durante 15 minutos.

- Adotar o mesmo procedimento do lado da pressão estática, só que succionando para obter a pressão de pelo menos

4.2. DETERMINAÇÕES

4.2.1. Medir a pressão de velocidade ΔP e a temperatura nos pontos especificados no método 1

4.2.2. Após terminar todas as medições, fazer novo ensaio de vazamento para validar as mesmas. Se for constatado algum vazamento, repetir as operações de 5.1.1 a 5.2.1.

4.2.3. Medir a pressão estática na seção transversal em estudo

4.2.4. Medir a pressão atmosférica local.

4.2.5. Determinar a massa molecular seca dos gases da chaminé.

4.2.6. Determinar a umidade do gás, de acordo com o método 4.

4.2.7. Determinar a área da seção transversal do duto ou chaminé, no ponto da amostragem. Na impossibilidade de fazer medições diretas das dimensões da seção do duto, podem ser usadas as dimensões constantes de projeto.

5. RESULTADOS

5.1. Calcular a velocidade média do gás nas condições da chaminé (v) e a vazão volumétrica do gás seco (Q_s), na condição padrão, usando as seguintes expressões:

$$a) \ v = K_1 \cdot C_p \cdot \sqrt{\overline{\text{delta}P}} \cdot \sqrt{\frac{T}{P \cdot M_{Mu}}}$$

$$b) \ Q_s = \frac{3600 \cdot (1 - Bag) \cdot v \cdot A \cdot T_p \cdot P}{T \cdot P_p}$$

onde:

v = velocidade média do gás em m/s.

Q_s = vazão volumétrica do gás seco, na condição padrão em m³/h.

$\overline{\text{delta}P}$ = média das raízes quadradas da pressão de velocidade dos gases em mmca.

C_p = coeficiente do tubo de pitot S, adimensional.

K_1 = constante do pitot S no sistema métrico.

M_{mu} = massa molecular do gás, base úmida em g/gmol.

M_{ms} = massa molecular do gás, base seca em g/gmol (determinada de acordo com o método 3).

P = pressão absoluta do gás, em mmHg ($P = P_{atm} \pm P_e$).

P_{atm} = pressão atmosférica em mmHg.

P_e = pressão estática do gás na chaminé em mmHg.

T = temperatura média absoluta do gás em Kelvin.

Bag = proporção, em volume, do vapor de água no fluxo gasoso (determinada de acordo com o método 4).

T_p = temperatura absoluta padrão = 293 K.

Pp = pressão absoluta padrão = 760 mmHg

A = área da seção transversal do tubo.

3600 = fator de conversão, em segundo/hora.

18 = massa molecular da água, em g/gmol.

MÉTODO 4

DETERMINAÇÃO DA UMIDADE DOS GASES

1.OBJETIVO

1.1. Esta norma prescreve o método de determinação da umidade dos efluentes gasosos em dutos e chaminés de fontes estacionárias.

1.2. A norma prescreve três variantes do método que são o Método de Referência, o Método do fluxo Saturado ou com gotículas e o Método Aproximado. Neste trabalho, faremos alusão apenas ao Método de Referência que deve ser utilizado quando o fluxo não está saturado e/ou não contém gotículas.

2. NORMAS COMPLEMENTARES

2.1. Na aplicação desta norma é necessário consultar:

método 1 - determinação dos pontos de amostragem

método 2 - determinação da velocidade e vazão dos gases.

3. DEFINIÇÕES

Para os efeitos desta norma são adotadas as seguintes definições:

3.1. FLUXO SATURADO - aquele em que a pressão parcial de vapor do líquido em questão é igual a pressão do vapor saturado do mesmo líquido a mesma temperatura.

3.2. PRESSÃO DE VAPOR SATURADO

Máxima pressão exercida pelo vapor de um determinado líquido sobre sua superfície líquida no estado de equilíbrio vaporização/condensação, numa determinada temperatura.

3.3. CONDIÇÕES PADRÃO (DE UM GÁS)

Pressão de 101325 Pa (760 mmHg) e temperatura de 293 K.

4. APARELHAGEM

Para a execução do ensaio é necessário a aparelhagem indicada a seguir:

4.1. No caso do Método de referência:

a) sonda, de material compatível com a corrosividade e temperatura do meio, provida de tubo de pitot S, de filtro para retenção do material particulado, de termopar e sistema de aquecimento que evite a condensação do vapor durante a amostragem;

b) condensador, composto de quatro borbulhadores ligados em série com conexões de vidro ou de outro material não contaminante, provido de termômetro na saída do quarto borbulhador, com menor divisão de 1°C. Os dois primeiros borbulhadores devem conter volumes conhecidos de água, o terceiro deve estar vazio e o quarto conter sílica-gel ou outro dessecante equivalente;

c) banho de gelo picado ou outro sistema de resfriamento equivalente;

d) sistema de medição e controle, composto basicamente de;

- vacuômetro.

- válvulas de agulha para controle do fluxo.

- bomba de vácuo.

- gasômetro seco, provido de termômetro na saída e entrada com menor divisão de 1°C

- placa de orifício - manômetro diferencial.

e) barômetro de mercúrio ou aneróide, com menor divisão de 266,6 Pa (mmHg);

f) proveta graduada com menor divisão de 1ml e balança com menor divisão de 0,5 g que permita a pesagem do borbulhador com sílica-gel;

g) termômetro com menor divisão de 1°C e cujo elemento sensível ou termopar é aquele acoplado à sonda (ver alínea a);

h) cronômetro.

5. EXECUÇÃO DO ENSAIO

5.1. PRINCÍPIO DO MÉTODO

Esta variante consiste em medir a umidade contida na amostra, condensando a parcela condensável e absorvendo em sílica gel o não condensado. Assim o condensado é medido volumetricamente e o absorvido gravimetricamente.

5.2. PROCEDIMENTO

5.2.1. Escolher uma sonda do tipo e comprimento adequados de modo que se tenha acesso à todos os pontos de amostragem.

5.2.2. Tarar o borbulhador que contém sílica-gel, arredondando para a graduação mais próxima. Alternativamente pode-se tarar os quatro borbulhadores e pesa-los gravimetricamente tanto a parcela do condensado e a do não condensado.

5.2.3. Quantificar e localizar os pontos de amostragem de acordo com L9.221. Marcar adequadamente a sonda de forma que as marcas resistam as condições do fluxo gasoso sem se apagar.

5.2.4. Montar o trem de amostragem como mostra a figura 15 .

5.2.5. Ligar e regular o sistema de aquecimento para uma temperatura de $(120 \pm 10 \text{ }^{\circ}\text{C})$.

5.2.6. Colocar gelo no sistema de resfriamento do condensador.

5.2.7. Determinar o perfil de velocidade no duto ou chaminé de acordo com L9.222.

5.2.8. Verificar se o trem de amostragem apresenta vazamento, fechando a entrada da sonda e produzindo uma depressão de 50663 Pa (380 mmHg). A taxa de vazamento não deve exceder 0,6 L/min. Nem 4 % da vazão média da amostragem.

5.2.9. O tempo total mínimo de amostragem deve ser de 60 min. E o volume mínimo deve ser de 600 litros nas condições padrão, sendo que o tempo mínima de coleta em cada ponto deve ser maior o igual a 2 min. Uma vazão média recomendável é cerca de 21,0 L/min.

5.2.10. Para cada ponto de amostragem, ou quando houver variação de vazão ou interrupção, anotar todos os dados que constam da folha de campo.

5.2.11. Coletar em todos os pontos e adicionar gelo suficiente para manter a temperatura abaixo de 20°C na saída do borbulhador com sílica-gel, para impedir perda excessiva de umidade.

5.2.12. Posicionar a boquilha no primeiro ponto, anotar a indicação do gasômetro, ligar imediatamente a bomba e ajustar o fluxo, mantendo a vazão de aspiração proporcional a velocidade do fluxo no ponto.

5.2.13. Depois da coleta, pesar o líquido coletado e determinar o aumento da massa de cada um dos borbulhadores com precisão de 0,5 g. Anotar todos os dados.

6. RESULTADOS

6.1. MÉTODO DE REFERÊNCIA

6.1.1. Calcular o volume de vapor de água coletada nos borbulhadores, nas condições padrão, pela seguinte fórmula:

$$V_{agcp} = 0,001335.(M_f - M_i)$$

onde:

V_{agcp} = volume de vapor de água coletado nos borbulhadores, nas condições padrão, em m³.

M_f = massa final dos borbulhadores em g.

M_i = massa inicial dos borbulhadores em g.

6.1.2. Calcular o volume do gás seco medido no gasômetro, nas condições padrão, pela seguinte fórmula:

$$V_{gcp} = \frac{0,3858.Y.V_g.P_g}{T_g}$$

onde:

V_{gcp} = volume de gás seco medido, nas condições padrão, em m³

Y = fator de calibração do gasômetro, adimensional.

V_g = volume de gás seco medido, nas condições do ensaio, em m³

P_g = pressão absoluta no gasômetro (pode ser considerada igual a pressão barométrica) em mmHg.

T_g = média das temperaturas médias do gás na entrada e saída do gasômetro, em K.

6.1.3. Calcular a umidade dos gases pela seguinte fórmula:

$$Bag = \frac{V_{agcp}}{V_{agcp} + V_{gcp}}$$

onde:

Bag = umidade expressa em termos de proporção em volume do vapor de água nos gases da chaminé ou duto.

Vagcp e Vgcp são indicados em 6.1.1. e 6.1.2.

MÉTODO 5

DETERMINAÇÃO DE MATERIAL PARTICULADO

MÉTODO DE ENSAIO

1. OBJETIVO

Esta norma prescreve o método de determinação do material particulado no fluxo gasoso em dutos ou chaminés.

NOTA: casos especiais terão seus resultados validados após estudo e aprovação pelo órgão oficial de defesa do meio ambiente.

2. NORMAS COMPLEMENTARES

Na aplicação desta norma é necessário consultar:

- método1 - determinação de pontos de amostragem em duto ou chaminé de fonte estacionária - procedimento.
- Método 2 - dutos e chaminés de fontes estacionárias - determinação da velocidade e vazão dos gases - método de ensaio
- método 3 - dutos e chaminés de fontes estacionárias - determinação da massa molecular seca e do excesso de ar do fluxo gasoso - método de ensaio.
- Método 4 - dutos e chaminés de fontes estacionárias - determinação da umidade dos efluentes - método de ensaio.

- Método 0 - dutos e chaminés de fontes estacionárias - calibração dos equipamentos utilizados na amostragem de efluentes - método de ensaio (CETESB E16.030).

3. DEFINIÇÕES

Para os efeitos desta norma é adotada a definição 3.1.

3.1. COLETA ISOCINÉTICA - coleta realizada em condições tais que o fluxo de gás na entrada do equipamento de amostragem tenha a mesma velocidade que o fluxo de gás que se pretende analisar.

4. APARELHAGEM

Para a execução do ensaio é necessário a aparelhagem descrita a seguir:

4.1.1. conjunto de boquilhas de aço inox com bordas finas e cônicas.

4.1.2. sonda, de material compatível com a corrosividade e temperatura do meio, provida de tubo de pitot S, de termopar e sistema de aquecimento que evite a condensação do vapor durante a amostragem;

4.1.3. porta filtro de vidro borossilicato.

4.1.4. sistema de aquecimento capaz de manter a temperatura de 120 +/- 10 °C no porta filtro durante todo o período da coleta.

4.1.5. condensador, composto de quatro borbulhadores do tipo Greenburg-Smith ligados em série com conexões de vidro ou de outro material não contaminante, provido de termômetro na saída do quarto borbulhador, com menor divisão de 1°C. Os dois primeiros borbulhadores devem conter volumes conhecidos de água, o terceiro deve estar vazio e o quarto conter sílica-gel.

NOTA: o segundo borbulhador deve ser com ponta normal e os outros 3, com ponta modificada.

4.1.6. banho de gelo picado ou outro sistema de resfriamento equivalente;

4.1.7. sistema de medição e controle, composto basicamente de;

- vacuômetro.

- válvulas de agulha para controle do fluxo.

- bomba de vácuo.
 - gasômetro seco, provido de termômetro na saída e entrada com menor divisão de 1°C.
 - placa de orifício.

 - 2 manômetros diferenciais com fundo de escala de 2,452 Pa (250 mmca).
- NOTA: os casos de pressões de velocidades inferiores a 12,75 PA (1,3 mmca) requerem o uso de manômetros de alta sensibilidade.
- barômetro de mercúrio ou aneróide, com menor divisão de 266,6 Pa (2 mmHg).
 - termômetro com menor divisão de 1°C e cujo elemento sensível ou termopar é aquele acoplado à sonda (ver 4.1.2).
 - cronômetro.

4.2. APARELHAGEM PARA PREPARAÇÃO E ANÁLISE DA AMOSTRA

- 4.2.1. Escova com comprimento um pouco maior que o da sonda.
- 4.2.2. Duas pissetas de vidro ou de polietileno.
- 4.2.3. Frasco de vidro de borossilicato ou de polietileno, com capacidade de 500 a 1000 ml, com tampa de vidro ou de polietileno.
- 4.2.4. Placas de Petri.
- 4.2.5. Cilindro graduado e balança, com precisão de 1ml e 0,5g respectivamente.
- 4.2.6. Frasco de plástico para armazenar a sílica gel.
- 4.2.7. Vidro de relógio.
- 4.2.8. Dessecador.
- 4.2.9. Balança analítica com precisão de 0,1 mg.
- 4.2.10. Béquers de 250 ml.

5. EXECUÇÃO DO MÉTODO

5.1. PRINCÍPIO DO MÉTODO

O material particulado é coletado isocineticamente ponto a ponto e sua massa é determinada gravimetricamente. Simultaneamente é determinado o volume de gás amostrado. A concentração de material particulado é obtida pela relação entre ambos.

5.2. REAGENTES

5.2.1. Filtro de fibra de vidro, livre de compostos orgânicos, apresentando pelo menos 99,95% de eficiência para a retenção de partículas de até 0,3 μm (micron).

5.2.2. Sílica-gel, com indicador de umidade , com granulometria de 1,0 a 3,4 mm (aproximadamente 16 mesh).

5.2.3. Água destilada.

5.2.4. Acetona grau P.A., com resíduo máximo de 0,001 %.

5.2.5. Sulfato de Cálcio anidro ou outro dessecante equivalente, com indicador de umidade.

5.3. PROCEDIMENTO

Antes de iniciar a amostragem certificar-se de que a aparelhagem esteja calibrada de acordo com o método 0.

5.3.1. PREPARAÇÃO PRELIMINAR

5.3.1.1. Pesar aproximadamente 200 - 300 g de sílica-gel, no borbulhador, que será utilizado na amostragem.

NOTA: sílica-gel previamente utilizada deve ser secada durante duas horas a 175 °C para poder ser reutilizada.

5.3.1.2. Certificar-se visualmente de que os filtros não apresentem qualquer irregularidade, numerá-los e dessecá-los a 20 +/- 5 °C à pressão ambiente, pelo menos durante 24 horas.

5.3.1.3. A seguir pesá-los, com precisão de 0,1 mg, a cada intervalo de 6 horas até que a diferença entre duas pesagens consecutivas seja igual ou inferior a 0,5 mg.

NOTA: durante cada pesagem o filtro não deve ficar exposto ao ambiente do laboratório cujo a umidade relativa não deve ser superior a 50%, por mais que dois minutos.

5.3.2. DETERMINAÇÃO PRELIMINAR

5.3.2.1. Selecionar o local de amostragem e o n° de pontos na seção transversal, de acordo com o método 1.

5.3.2.2. Determinar a pressão estática na seção de amostragem.

5.3.2.3. Determinar a temperatura na seção de amostragem.

5.3.2.4. Determinar a pressão de velocidade de acordo com o método 2.

5.3.2.5. Determinar o teor de umidade de acordo com o método 3.

5.3.2.6. Determinar o tempo de coleta em cada ponto, de acordo com a fonte a ser amostrada, não devendo este, ser menor que dois minutos.

5.3.2.7. Selecionar a boquilha da sonda para uma faixa de pressão de velocidade, de modo que não ocorra troca durante a amostragem.

5.3.3. PREPARO DOS EQUIPAMENTOS PARA A COLETA DA AMOSTRA.

5.3.3.1. Montar o trem de amostragem como mostra a figura 15.

5.3.3.2. Colocar 100 ml de água destilada em cada um dos dois primeiros borbulhadores, deixando o terceiro vazio e o quarto com a sílica-gel (ver 5.3.2.1).

5.3.3.3. Pesar cada um dos borbulhadores com precisão de 0,5 g.

5.3.3.4. Colocar o filtro, previamente tarado no porta filtro.

5.3.3.5. Manter os borbulhadores no banho de gelo.

5.3.5.5. Ligar a bomba e ajustar o fluxo, abrindo a válvula de ajuste grosso e, em seguida, ajustar a vazão com válvula do ajuste fino para uma amostragem isocinética e simultaneamente acionar o cronômetro. Considerar isocinética a amostragem em cada ponto se o valor calculado conforme 6.1.10 (a) estiver entre 90 e 110 %

NOTA: normógrafos e calculadoras são necessários para a facilidade da operação isocinética.

5.3.5.6. Certificar-se de que a depressão no vacuômetro não exceda 50663 Pa (380 mmHg). Se isto ocorrer, repetir o teste de vazamento (como indicado em 5.3.4.) e trocar o filtro. Anotar a taxa de vazamento caso este ocorra.

5.3.5.7. Manter a temperatura dos gases que saem do último borbulhador (sílica-gel) abaixo de 20 °C.

5.3.5.8. O tempo de coleta em cada ponto não deve ser inferior a 2 min e o tempo total da coleta, não deve ser inferior a 60 min. O volume total coletado não deve ser inferior a 850 L.

5.3.5.9. Anotar os dados necessários para os cálculos num formulário.

5.3.5.10. Coletar a amostra do gás para determinação da sua massa molecular seca, conforme método 3.

5.3.5.11. No final da amostragem, simultaneamente, desligar a bomba de vácuo e o cronômetro. Retirar a sonda do interior da chaminé ou duto e registrar a leitura final do gasômetro.

5.3.5.12. Fazer teste de vazamento (como indicado em 5.3.4.) na depressão máxima registrada durante a amostragem e anotar a taxa de vazamento caso este ocorra.

5.3.5.13. Calcular o valor da isocinética de acordo com 6.1.10 (b). Considerar válida a amostragem se o valor encontrado estiver na faixa de 90 a 110 %.

5.4. RECUPERAÇÃO E MANUSEIO DA AMOSTRA

5.4.1. Remover a sonda e fechar com rolha todas as aberturas existentes na sonda, porta-filtro e borbulhadores.

5.4.2. Remover em um vidro de relógio, previamente pesado, o filtro com a amostra coletada de material particulado.

5.4.3. Remover em béquer, previamente pesado, todo o material particulado depositado no interior da boquilha, sonda e erlenmeyer.

NOTA: para remover o material particulado da boquilha, sonda e erlenmeyer utilizar a escova e uma mistura de acetona e água destilada. Lavar até que nenhum material seja percebido visualmente.

5.4.4. Registrar o volume total da mistura utilizada.

5.5. ANÁLISE

5.5.1. Colocar o vidro de relógio que contém o filtro em um dessecador contendo sulfato de cálcio anidro ou um dessecante equivalente por 24 horas.

5.5.2. Pesá-los, com precisão de 0,1 mg, a cada intervalo de 6 horas até que a diferença entre duas pesagens consecutivas seja igual ou inferior a 0,5 mg.

NOTA: durante cada pesagem o filtro não deve ficar exposto ao ambiente do laboratório, cuja umidade relativa não deve ser superior a 50%, por mais que dois minutos.

5.5.3. Colocar numa placa de aquecimento o béquer que contém o material particulado até evaporação total da mistura.

5.5.4. Dessecar por 24 horas e pesar com aproximação de 0,1 mg, anotando a massa somente quando a diferença entre duas pesagens consecutivas for menor ou igual que 0,5 mg.

NOTA: durante cada pesagem o filtro não deve ficar exposto ao ambiente do laboratório, cuja umidade relativa não deve ser superior a 50%, por mais que dois minutos.

5.5.5. Pesar cada um dos borbulhadores com precisão de 0,5 g.

5.5.6. Efetuar a prova em branco da mistura, da seguinte maneira:

- colocar 200 ml da mistura acetona/água destilada em béquer de 250 ml, previamente pesado, e proceder conforme 5.5.3. e 5.5.4.

5.5.7. Determinar a massa molecular seca de acordo com o método 3.

5.5.8. Anotar todos os dados num formulário.

5.6. REPRESENTATIVIDADE DA AMOSTRAGEM

É necessário que a amostragem seja representativa nas condições de operação da fonte de emissão. Deve-se então efetuar pelo menos duas determinações de material particulado por fonte. A amostragem deve ser considerada representativa se os resultados obtidos em cada coleta não forem discrepantes entre si.

NOTA: o número de coletas é pelo órgão ambiental competente.

6. RESULTADOS

6.1. CÁLCULOS

Usando nomenclatura de 6.2, proceder aos cálculos indicados em 6.1.1. a 6.1.5.

6.1.1. Pressão absoluta do gás na chaminé ou duto:

$$P_c = P_{atm} + P_{est}$$

6.1.2. Pressão absoluta no gasômetro:

$$P_m = P_{atm} + \frac{\Delta H}{13,6}$$

6.1.3. Volume de água nas condições da chaminé ou duto nos casos de fluxo não saturado e sem gotículas:

$$V_{acc} = \frac{M_{H_2O} \cdot T_c \cdot 0,06236}{18 \cdot P_c}$$

6.1.4. Volume de gás medido nas condições da chaminé ou duto:

$$V_{mcc} = \frac{V_m \cdot T_c \cdot P_m \cdot F_{cm}}{T_m \cdot P_c}$$

sendo que:

$$M_{H_2O} = M_f - M_i$$

6.1.4.1. No caso de constatar-se, durante e/ou no final da amostragem, um vazamento superior a 0,6 l/min o valor de V_g deve ser calculado como abaixo indicado:

$$V_g = (V_{gf} - V_{gi}) - S_i \cdot Q_i \cdot \Pi$$

6.1.5. Umidade nos casos de fluxo não saturado e sem gotículas:

$$P_{vva} = \frac{V_{acc}}{V_{acc} + V_{mcc}}$$

6.1.6. Umidade nos casos de fluxo saturado ou com gotículas:

$$P_{vva} = \frac{P_{vsc}}{P_{atm} + P_{est}}$$

6.1.7. Volume de água na condições da chaminé ou duto nos casos de fluxo saturado ou com gotículas:

$$V_{acc} = \frac{P_{vva}.V_m}{1 - P_{vva}}$$

6.1.8. Massa molecular base úmida:

$$M_{mu} = M_{ms}. (1 - P_{vva}) + 18.P_{vva}$$

6.1.9. Velocidade média do gás na chaminé ou duto:

$$V_c = 2098,2.F_{cp}.\sqrt{\Delta P}.\sqrt{\frac{T_c}{P_c.M_{Mu}}}$$

6.1.10. Isocinética:

$$I = \frac{V_{mcc} + V_{acc}}{\Gamma.A_b.V_c}$$

6.1.11. Vazão nas condições da chaminé ou duto:

$$V_{aecc} = A_c . V_c . 60$$

6.1.12. Vazão nas condições normais (0°C e 1 atm), base seca:

$$V_{aecns} = \frac{V_{aecc}.273.P_c.(1 - P_{vva})}{T_c.760}$$

6.1.13. Volume de gás nas condições normais (0°C e 1atm), base seca:

$$V_{mcnbs} = \frac{V_m.273.P_m.F_{cm}}{T_m.760}$$

6.1.14. Concentração de material particulado nas condições normais, base seca:

$$CMP = \frac{M_{tMP}}{V_{mcnbs}}$$

6.1.15. Taxa de emissão de material particulado:

$$Te_{MP} = 10^{-6}.CMP.V_{aecnbs}$$

6.2. NOMENCLATURA

Simb.	Definição	Unid.
Ab	Área da boquilha	m ²
A	Área da chaminé	m ²
Pvva	Umidade dos gases/proporção em volume do vapor d'água dos gases no duto	adimensional
CMP	concentração do material particulado nas condições normais, base seca	mg/Nm ³
Fcp	Coefficiente do pitot S	adimensional
I	Isocinética	%
MH ₂ O	Massa total de água coletada nos borbulhadores	g
MtMP	Massa total de material particulado coletado	mg
MMs	Massa molecular base seca	g/g mol
MMu	Massa molecular base úmida	g/g mol
Pc	Pressão absoluta do gás na chaminé ou duto	mmHg
Patm	Pressão atmosférica	mmHg
Pest	Pressão estática na chaminé ou duto	mmHg
Pm	Pressão absoluta no gasômetro	mmHg
PVS	Pressão de vapor de saturação	mmHg
Vaecc	Vazão do efluente nas condições da chaminé ou tubo	m ³ /h
Qi	Taxa de vazamento no período i	m ³ /min
Vaecnbs	Vazão do efluente nas condições normais, base seca.	Nm ³ /h
Tc	Temperatura absoluta média do gás na chaminé ou duto	K
TeMP	Taxa de emissão de material particulado	Kg/h
Tm	Média das temperaturas do gás na entrada e saída do gasômetro no ponto de col.	K
Vc	Velocidade média do gás na chaminé ou duto	m/s
Vmcc	Volume do gás medido no gasômetro nas condições da chaminé ou duto	m ³
Vacc	Volume de água nas condições da chaminé ou duto	m ³
Vm	Volume do gás seco medido no gasômetro nas condições do ensaio	m ³
Vgf	Leitura final do gasômetro	m ³
Vgi	Leitura inicial do gasômetro	m ³
Vmcnbs	Volume do gás medido nas condições normais, base seca	Nm ³
Fcm	Fator de correção do medidor	adimensional
Db	Diâmetro da boquilha	m
Γ	Tempo total de coleta	min
Γi	Duração do período i	min

7. SELEÇÃO DA BOQUILHA

- a) A fim de manter a condição isocinética durante toda a amostragem sem troca de boquilha, é de fundamental importância a boa escolha do diâmetro.
- b) Existem vários caminhos a seguir, para a seleção do diâmetro mais adequado de boquilha, para cada conjunto de condições de uma amostragem.
- c) O procedimento baseado no cálculo direto do diâmetro da boquilha, baseado nas condições fluidodinâmicas no conjunto chaminé - trem de amostragem, é mais genérico e por é aqui recomendado.
- d) O diâmetro da boquilha, por este procedimento, é calculado pela seguinte fórmula:

$$Db = \sqrt{\frac{(608.Qm.Pg)}{(Tm.Cp.(1 - Bag))}} \cdot \sqrt{\frac{T.MMu}{P.\Delta P}}$$

onde:

Db = Diâmetro da boquilha, em mm.

Qm = Vazão do fluxo gasoso no medidor, em m³/min.

Tm = Temperatura no medidor, em K.

DeltaP= Média das pressões de velocidade, em mmH₂O.

Pg, Cp, Bag, T, Mmu e P tem o significado e unidades indicados em 6.2.

Escolhe-se a boquilha cujo diâmetro mais se aproxime do calculado acima.

16. CONCLUSÃO

Os ciclones, como mencionado anteriormente, são projetados, atendendo a limitações especificadas pela perda de carga. As formulações para o cálculo da perda de carga, a partir de considerações fundamentais, não são muito confiáveis. O que se sabe na prática, é que a perda de carga pode ir de 1 a 20 vezes a pressão cinética na entrada. Sabe-se contudo, que ciclones semelhantes (dimensões proporcionais) têm a mesma perda de carga. Alguns pesquisadores chegaram a formulações com coeficientes específicos para cada ciclone. Não há informações suficientes que comprovem estas formulações, porém, são importantes para nos direcionar no sentido de estarmos mais próximos de valores reais.

Ainda hoje, a expressão mais satisfatória para formulação de um parâmetro de eficiência, é a do diâmetro de partícula mínima (Rosin, Rammler e Intelmann), diâmetro da partícula que seria completamente separada da corrente de gás num ciclone.

$$D_{p,min} = \left[\frac{9 \cdot \mu \cdot B_c}{\pi \cdot N_{tc} \cdot V_c \cdot (\rho_s - \rho)} \right]^{0,5}$$

No exemplo estudado alteramos alguns fatores para diminuir o D_p melhorando a eficiência do ciclone.

Da formulação teórica clássica proposta por Rosin, Rammler e Intelmann para a eficiência de ciclones, chegamos a equação 9, através da aproximação da curva da figura 5, que envolve a eficiência, um coeficiente $K = 0,487$, o diâmetro da partícula de referência e o diâmetro de corte.

$$\eta = K \cdot \left(\frac{D_p}{D_{PC}} \right)^{1,95} \quad K = 0,487 \quad (9)$$

Esta eficiência é particular ao diâmetro de referência D_p . É importante salientar que a eficiência global é um somatório das eficiências de cada tamanho de partícula ponderada com a população total de sólidos. Podemos criar portanto, um conceito de faixas de eficiência onde poderemos somatizar as eficiências relativas ponderando-as na faixa da população que ela compreende.

17. BIBLIOGRAFIA

- FARIA, D. S., **“Fabricação de Leite em Pó”**, Faculdades Oswaldo Cruz. Trabalho de Formatura. 1994.
- I. SCHWEITZER, PHILIP A., **“Handbook separation Tchniques for Chemical Engineers”**, MacGraw-Hill.
- MARTINS, ANTÔNIO C., **“Apostila Estágio Técnico para Auditores”**, Fábrica NESTLÉ - Araçatuba. 1993.
- MCCABE, W. L., **“Unit Operations of Chemical Engineering”**, MacGraw-Hill.
- PERRY, ROBERT CHILTON, Cecil COLHER. **“Chemical Engineers Handbook”**. Editora McGraw-Hill. Tokyo, Japan. 1990.
- TETRA PAK PROCESSING SYSTEMS AB, **“Dairy Processing Handbook”**. Lund, Sweden. 1995.
- OGAWA, A., **“Separation of Particles from Air and Gases”**, CRC Press. Volumes I e II. 1940.
- HESKETH, H.E., **“Air Polution Control”**, Ann Arbor Science Publischers inc. 1981.
- PARKER, A., **“Industrial Air Polution Handbook”**, MacGraw-Hill. 1978.